



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE ELECTROTÉCNIA Y COMPUTACIÓN

DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DIGITALES Y TELECOMUNICACIONES

**Monografía para optar al Título de
Ingeniero Electrónico**

Título:

**Estudio del Comportamiento de los Esquemas de Modulación Digital en LTE
usando Matlab®.**

Autor: Br. Javier Ricardo Aubert Cárcamo, Carnet: 2008-23172

Tutor: Marvin Arias Olivas, PhD.

Managua, Nicaragua

Agosto de 2016

Dedicatoria

A Dios por darme la fuerza necesaria para afrontar la realización de esta monografía.

A mis padres, por creer en mi y apoyarme durante todo este largo proceso.

Agradecimientos

Agradezo primeramente a Dios, sin Él nada de esto hubiese sido posible, al doctor Marvin Arias Olivas, por su tiempo, paciencia y su invaluable ayuda para la realización de esta monografía y a toda mi familia por haberme apoyado todos estos años.

Resumen

Las comunicaciones móviles celulares se han convertido en una parte esencial de las telecomunicaciones mundiales. Sin embargo, estos sistemas como en el Long Term Evolution (LTE), que es una tecnología de cuarta generación (4G) creada por el Third Generation Partnership Project (3GPP, por sus siglas en inglés), sufren de los efectos de propagación por múltiples trayectorias. En LTE Release 8, es una de las tecnologías de banda ancha basada en las técnicas de Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Multiantenas (MIMO), modulación y codificación digital adaptativa, (AMCS), etc, se está comercializando actualmente en muchos países y recientemente en Nicaragua. LTE Release 8, (comercialmente conocido como 4G), que se despliega sobre todo en un diseño de macro / microcélula, proporciona una mayor capacidad y cobertura de la red , mayor velocidad de transmisión de datos de alta, baja latencia, reducción de los costos operativos, el soporte de múltiples antenas, el funcionamiento de ancho de banda flexible y una perfecta integración con los sistemas predecesores existentes de segunda y tercera generación conocidas como 2G y 3G respectivamente.

En este trabajo monográfico analizamos por simulaciones desarrolladas en Matlab®, un enlace físico de bajada (DL) con arreglos de antenas de 2x2 utilizando modulación digital, los esquemas del estándar LTE rel 8, modulación y codificación de canal adaptativos basándose en las mediciones del Channel Quality Indicator, (CQI, por sus siglas en inglés). El índice de CQI reportado a la BS por el UE se deriva de la calidad de la señal de enlace descendente (DL). Analizamos los esquemas de modulación digital usados en el estándar de LTE (QPSK, 16QAM y 64QAM) en conjunto con las otras técnicas de LTE como OFDMA, MIMO, para poder simular con ayuda de MATLAB® un enlace de bajada (DL) y analizar su desempeño frente a diferentes tipos de canal definidos para LTE. Se evaluaron esquemas de diversidad y de multiplexado espacial para el rendimiento del enlace descendente (DL). Los resultados de la simulación demuestran que se obtiene mejor calidad en el enlace y se pueden obtener mayores velocidades de transmisión. Lo más importante se obtiene mejor rendimiento del ancho de banda.

Abstract

Mobile communications have become an essential part of global telecommunications. However, these systems as the Long Term Evolution (LTE), which is a fourth generation (4G) technology created by Third Generation Partnership Project (3GPP), suffer from the effects of multipath. In LTE Release 8, (commercially known as 4G), which is one of the broadband technologies based on techniques Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Multiantenas (MIMO), adaptive modulation and digital encoding, (AMCS), etc., is currently marketed in many countries and recently in Nicaragua. LTE Release 8, which is deployed mainly in design macro / microcell provides greater capacity and network coverage, high peak data rates, low latency, reduced operating costs, support of multiple antennas the operation of flexible bandwidth and seamless integration with existing systems predecessors second and third generation known as 2G and 3G respectively.

In this monograph we analyze by simulations developed in Matlab®, a physical downlink (DL), with antenna arrays 2x2 using digital modulation schemes LTE standard rel 8 adaptive modulation and coding based on measurements of Channel Quality Indicator (CQI). The CQI index reported to the BS by the UE is derived from the quality of the downlink (DL) signal. We analyze digital modulation schemes used in the LTE standard (QPSK, 16QAM and 64QAM) in conjunction with the other techniques of LTE as OFDMA, MIMO, to simulate using MATLAB one downlink (DL) and analyze their performance against different channel types defined for LTE. diversity schemes for spatial multiplexing and performance downlink (DL) were evaluated. The simulation results show that better quality is obtained on the link and you can get higher transmission speeds. Most importantly better performance bandwidth is obtained.

Lista de Acrónimos

1G: First Generation	ITU: International Telecommunication Union
2G: Second Generation	LTE: Long-Term Evolution
3G: Third Generation	MIMO: Múltiple-Input Múltiple-Output
3GPP: 3rd Generation Partnership Project	MME: Mobility Management Entity
4G: Fourth Generation	OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
5G: Fifth Generation	OFDMA: Orthogonal Frequency División Multiple Access
AMPS: Advanced Mobile Phone System	QAM: Quadrature Amplitude Modulation
ATM: Asynchronous Transfer Mode	QPSK: Quadrature Phase-Shift Keying
BER: Bit Error Rate	QoS: Quality of Service.
BS: Base Station	RAN: Radio Access Network
CDMA: Code Division Multiple Access	SC-FDMA: Single Carrier - Frequency Division Multiple Access
DL: Downlink	SM: Spatial Multiplexing
EDGE: Enhanced Data Rates GSM of Evolution	SNR: Signal-to-Noise Ratio
eNB: Evolved Node B	SINR: Signal-to-Interference Plus Noise Ratio
eUTRAN: Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network	TDD: Time Division Duplex
FDD: Frequency Division Duplex	UE: User Equipment
GPRS: General Packet Radio Service	UL: Uplink
GSM: Global System for Mobile Communications	UMTS: Universal Mobile Telecommunications System
HARQ: Hybrid Automatic Repeat Request	UTRAN: UMTS Terrestrial Radio Access Network
HSDPA: High Speed Downlink Packet Access	WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access
HSPA: High-Speed Packet Access	WIFI: Wireless Fidelity
HSPA+: High Speed Packet Access Evolution	WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access
IMT: International Mobile communication	
IP: Internet Protocol	

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Comparación de WCDMA y LTE [8]	14
Tabla 2-2 Bandas de operación de LTE [2].....	16
Tabla 2-3 Comparación entre LTE rel 8 y LTE rel 10 e IMT Advanced	18
Tabla 2-4 Categorías de teléfonos móviles [10]	18
Tabla 3-1 Esquemas de modulación y codificación [2].	25
Tabla 4-1 Path Gains y Time Delays EPA.....	29
Tabla 4-2 Path Gains y Time Delays EVA.....	29
Tabla 4-3 Path Gains y Time Delays ETU.....	29
Tabla 4-4 Número de resource blocks por ancho de banda en LTE [19].....	33
Tabla 5-1 Parámetros de simulación.....	42
Tabla 5-2 Tabla de resultados modulaciones vs data rate, BER, code rate y SINR	49

Índice de Figuras

Fig. 1-1 Esquema básico de un Sistema de Comunicación [3].....	5
Fig. 1-2 Esquema de un Sistema de Comunicación [3]	6
Fig. 1-3 Modelo de Canal con Ruido Aditivo [3].....	7
Fig. 1-4 Sistemas de una red GSM [5]	9
Fig. 1-5 Posible arquitectura de una red 5G. [6].....	11
Fig. 2-1 Estructura de una red LTE rel 8 [9]	15
Fig. 2-2 Comparación entre una red LTE rel 8 y una red 3G [11].....	17
Fig. 2-3 Evolución del LTE [10]	18
Fig. 3-1 Constelación QPSK [15]	24
Fig. 3-2 Constelación 16QAM [15].....	24
Fig. 3-3 Constelación 64QAM [15].....	24
Fig. 3-4 Diagrama de bloques del algoritmo de adaptatividad	26
Fig. 4-1 High speed train condition. [18]	30
Fig. 4-2 Representación tiempo-frecuencia de una señal OFDM [19]	32
Fig. 4-3 Resource Blocks [16].....	32
Fig. 4-4 MIMO [20].....	33
Fig. 4-5 Performance de MIMO [16]	34
Fig. 4-6 Close loop diversidad. [16]	36
Fig. 4-7 Esquema de transmisión de Multiplexación espacial [16].....	38
Fig. 5-1 Zonas de análisis del performance de un enlace de descarga	43
Fig. 5-2 Esquema de close loop spatial multiplexing [16]	43
Fig. 5-3 S.M.: SNR vs. Velocidad de transmisión.....	44
Fig. 5-4 S.M.: SNR vs. Bit Error Rate	44
Fig. 5-5 S.M: SNR vs Esquemas de Modulación.....	45
Fig. 5-6 Diversity [16]	45

Fig. 5-7 Diversidad: SNR vs.Bit Error Rate	46
Fig. 5-8 Diversidad: SNR vs. Velocidad de transmisión	46
Fig. 5-9 Diversidad: SNR vs. Esquemas de Modulación.....	47
Fig. 5-10 Multiplexación espacial, SNR vs VER sin AMC.....	47
Fig. 5-11 Diversidad, modulación vs BER, code rate, SINR y Velocidad.....	48
Fig. 5-12 Freq. Selective High Mobility: SNR vs.Modulacion	50
Fig. 5-13 Freq- Selective Low Mobility:SNR vs.Modulaciones.....	50
Fig. 5-14 Diversidad Flat Fading Channel: SNR vs.Modulaciones.....	51
Fig. 5-15 Multiplexación Espacial Flat Fading: SNR vs. Modulaciones	51
Fig. 5-16 Datos obtenidos desde el móvil Samsung J1	52

Índice

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos	ii
Resumen.....	iii
Abstract	iv
Lista de Acrónimos.....	v
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras	vi
Introducción	1
Planteamiento del Problema.....	2
Objetivos	2
General:.....	2
Específicos:	2
Justificación	3
1 Introducción a los sistemas de comunicaciones digitales.....	5
1.1 Marco teórico.....	5
1.2 Canal de telecomunicaciones.....	7
1.3 Canal de ruido aditivo o AWGN:	7
1.4 Evolución de las telecomunicaciones móviles	8
1.4.1 Global System for Mobile Communications.....	8
1.4.2 General Packet Radio Service (GPRS) y EDGE	9
1.4.3 Universal Mobile Telecommunications Systems (UMTS) y High- Speed Packet Access (HSPA)	9

1.4.4	Long Term Evolution (LTE)	10
1.4.5	Redes 5G	10
2	Long Term Evolution, LTE release 8	13
2.1	Long Term Evolution (LTE) release 8.....	13
2.2	LTE release 8 vs otros releases	18
2.2.1	Codificación de Canal en LTE release 8.....	19
3	Esquemas de modulación digital en LTE release 8	21
3.1	Esquemas de modulación	21
3.1.1	Modulación M-ARY	22
3.1.2	M-QAM	22
3.1.3	QPSK.....	23
3.2	Adaptive Modulation and Coding	24
3.3	Algoritmo de elección del MCS	26
4	Otras técnicas usadas en LTE release 8	27
4.1	Modelos de canal en LTE release 8	27
4.2	OFDM	31
4.3	MIMO	33
4.3.1	MIMO en LTE	35
CAPITULO 5.....		41
5	Análisis y presentación de resultados:	41
5.1	MATLAB	41
5.2	Simulaciones	42
5.3	Simulaciones y análisis de resultados.....	42
6	Conclusiones	55
7	Recomendaciones y trabajos a futuro	56
8	Bibliografía	57
I.	Anexos.....	I
	Anexo 1 Códigos de Matlab	I
	Anexo 2 Hoja técnica del Samsung J1 [12].....	IV

Introducción

El rápido avance tecnológico en el campo de la telecomunicaciones ha permitido crear dispositivos móviles cada vez más sofisticados y capaces de proporcionar una amplia gama de aplicaciones, con lo cual la aceptación y penetración de la telefonía móvil a nivel mundial es más que evidente, convirtiéndose el teléfono celular en un dispositivo indispensable en la vida cotidiana del mundo actual [1].

En las redes LTE, además de mejorar la capacidad en el acceso mediante el uso de la técnica OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) y el empleo de técnicas Multi antenas MIMO (Multiple Input Multiple Output por sus siglas en inglés), adicionalmente, el acondicionamiento de la señal analógica previa a ser transmitida es mapeada a una señal digital, y es hasta entonces que dicha señal es modulada por algún método de modulación según las características del sistema, en las redes LTE se emplean esquemas de modulación de orden mayor como 16QAM y 64QAM [2]. De igual manera (pero más eficiente) que en las redes de 3G (HSPA y HSPA+), en LTE incrementan las velocidades de transmisión cuando se da el uso de esquemas de modulación 16QAM y 64-QAM, el uso de estos esquemas mejoran en mayor grado la capacidad en el acceso mediante el uso de la técnica OFDMA y el empleo de técnicas MIMO.

El presente trabajo monográfico pretende realizar el análisis del comportamiento de los esquemas de modulación digital usados en las redes LTE (Reléase 8) por medio de simulaciones experimentales implementadas en Matlab®.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: El primer capítulo es introductorio, información general sobre las telecomunicaciones. El capítulo dos habla sobre LTE, que es y como funciona, el capítulo tres trata sobre los esquemas de modulación digital, el capítulo cuatro sobre otras técnicas que utiliza LTE en conjunto a los esquemas de modulación y el capítulo cinco se presentan las simulaciones y sus análisis.

Nuestras pruebas consisten en simulaciones hechas en Matlab mediante códigos de un enlace de bajada, physical downlink shared channel (PDSCH). Simularemos los tipos de canal que establece el estándar del 3GPP que son EPA, EVA y ETU, con distintos niveles de SNR para poder ver el desempeño de los esquemas de modulación y la manera en la

que estos pueden ir cambiando en dependencia de la condición del canal en el que se encuentre.

Planteamiento del Problema

En la actualidad, uno de los mayores problemas que encontramos en las redes móviles actuales para los usuarios de telefonía móvil, es la velocidad y disponibilidad de recurso para la demanda de servicios creciente, como una de las mayores dificultades que los operadores deben enfrentar para brindar un servicio de calidad a los usuarios.

En este sentido, se centrarán esfuerzos por estudiar las características técnicas que LTE (reléase 8) posee para mejorar los servicios que actualmente se proveen que incrementa la velocidad de transmisión de datos que incluye el uso de esquemas de modulación multinivel tales como 16QAM y 64QAM que se utilizan también en redes de 3G avanzadas.

Objetivos

General:

Realizar un estudio de los diferentes esquemas de modulación digital usados en LTE mediante la implementación de simulaciones con el software Matlab.

Específicos:

Analizar el funcionamiento de los esquemas de modulación digital usados en la tecnología LTE.

Realizar simulaciones de LTE en función de la distancia y en ambientes urbanos (outdoors) para evaluar los esquemas de modulación digital que mejor se adapten a ese entorno.

Analizar por simulación los esquemas de modulación usados en LTE en función de diferentes interferencias (SNR) y velocidades de transmisión de datos.

Justificación

Los sistemas de comunicación digital son ampliamente utilizados en el país, en los hogares varias familias cuentan con una red WIFI, en centros comerciales, restaurantes, en fin varios lugares cuentan con redes WIFI también gracias al despliegue de comunicaciones móviles cuyo estándar más actualizado utiliza tecnologías como OFDM, MIMO y modulación variable, es decir, el sistema estima el estado del canal, es lo que se conoce como CQI (Channel quality indicator) y con esta información el sistema puede ajustar su esquema de modulación dependiendo del estado del canal [2] En Nicaragua tiene muy poco desde que se desplegaron las primeras redes, por tanto es necesario comprender cómo funcionan estas tecnologías que son parte de HSPA+ y de LTE.

Finalmente, nuestro mayor aporte será en las pruebas en simulaciones con MATLAB® donde se analizará el comportamiento de los diferentes esquemas de modulación en la tecnología LTE (reléase 8) ante la situación establecida por las condiciones del canal en ambientes exteriores (outdoors).

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

CAPÍTULO 1

1 Introducción a los sistemas de comunicaciones digitales

En este capítulo introduciremos brevemente los sistemas de comunicaciones digitales haciendo un breve recorrido desde los primeros sistemas de comunicaciones, el 2G, 3G, 4G, y un poco de lo que se piensa podría ser el 5G.

1.1 Marco teórico

Todo sistema de comunicación (Analógico o Digital) está comprendido por tres partes funcionales: El Transmisor, el Canal y el Receptor [3].

El Transmisor: Equipo que tiene asociado varios subsistemas electrónicos que realizan diferentes funciones: Traslación de frecuencia, modulación, filtraje, ganancia y codificación de las señales de información a ser transmitidas a través del canal, con el propósito de ser recuperadas a un margen de error mínimo y así garantizar que todas las señales acondicionadas en él, lleguen de modo óptimo al receptor.

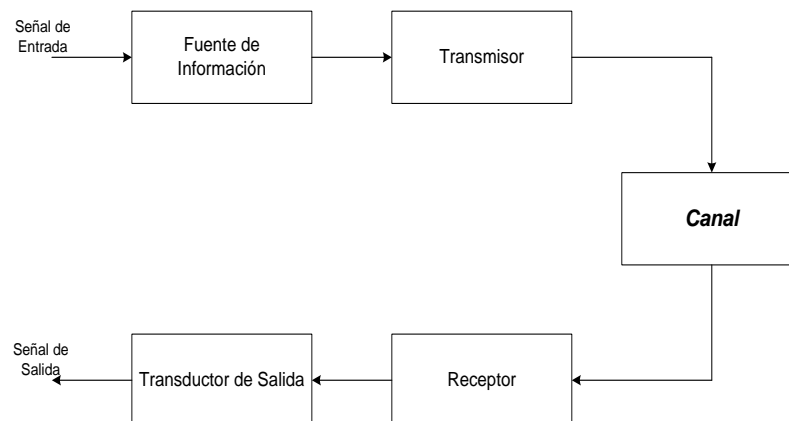


Fig. 1-1 Esquema básico de un Sistema de Comunicación [3]

El Canal: medio físico por el que se transmite una señal eléctrica, desde el transmisor al receptor. Cualquiera sea el medio físico utilizado, la esencial característica es que la señal transmitida es corrupta al azar por una variedad de posibles procesos propios del canal y sus respectivas consecuencias: ruido aditivo, Interferencia Ínter simbólica, atenuación, etc.

La forma más común de degradación de la señal viene en la forma de ruido aditivo, el cual se genera a la entrada y salida del receptor, donde la amplificación de la señal es realizada. Este ruido es a menudo llamado ruido térmico. Otro tipo de degradación que limita el desempeño de un sistema de comunicación es lo que se conoce como ISI (Intersymbol Interference, por sus siglas en inglés) que afecta la recepción e interpretación de los datos transmitidos a causa de las imperfecciones del canal trayendo como consecuencia un aumento no deseado del BER (Bit Error Rate, por sus siglas en inglés) [3].

Receptor: La función del receptor es recobrar la señal de mensaje contenida en la señal recibida. Además de realizar la función primaria de demodular la señal, el receptor también desarrolla un número de funciones periféricas similares a las realizadas por el transmisor.

A su vez cada uno de estos elementos posee otros elementos que los conforman, como se muestra a continuación:

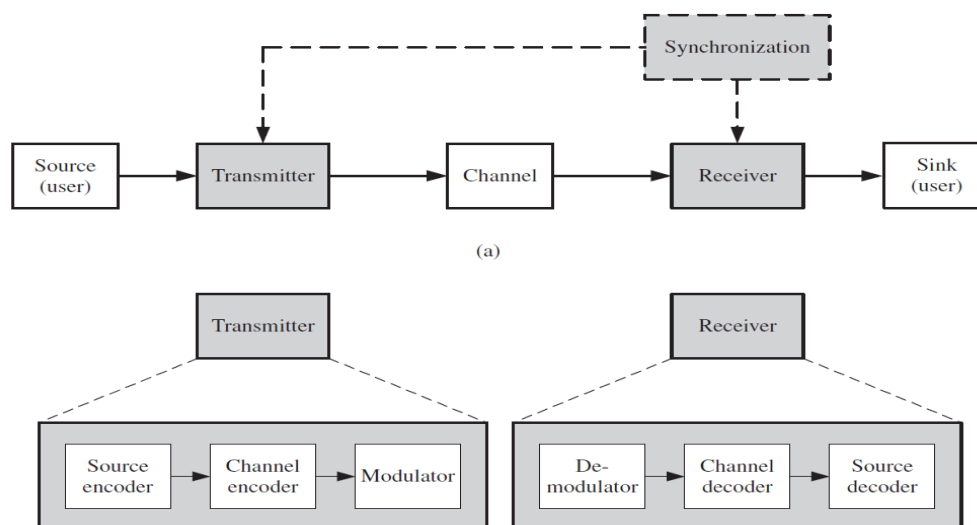


Fig. 1-2 Esquema de un Sistema de Comunicación [3]

En el transmisor el primer bloque es la codificación de la fuente que consiste en preparar los mensajes que serán enviados, es decir convertirlos en bits, esto lo hace eliminando la redundancia del mensaje y representándola por un símbolo tomado de un diccionario finito y transmitiéndola cada cierto tiempo. La codificación de canal lo que hace es agregar bits de redundancia para proteger el mensaje original de los efectos que pueda tener el canal. El demodulador convierte los mensajes en señales que pueden ser transmitidas por el canal, porque a la entrada del modulador lo que tenemos son bits, sin embargo estos no se pueden transmitir por el canal, no sin antes recibir un tratamiento del cual se encarga el modulador. En el receptor tenemos los procesos inversos de todas estas funciones, a fin de obtener el mensaje original. [4]

1.2 Canal de telecomunicaciones

Un canal está definido desde el punto de vista telemático por sus propiedades físicas: naturaleza de la señal que es capaz de transmitir, velocidad de transmisión, ancho de banda, nivel de ruido que genera, modo de inserción de emisores y receptores, etc.

Para señales electromagnéticas se puede utilizar multitud de canales dependiendo de la frecuencia de las señales transmitidas: cables, el vacío (satélites), la propia atmósfera, etc. Uno de los modelos de canal utilizados frecuentemente para modelar/caracterizar algunos de los canales físicos encontrados en la práctica es el Canal de Ruido Aditivo o AWGN.

1.3 Canal de ruido aditivo o AWGN:

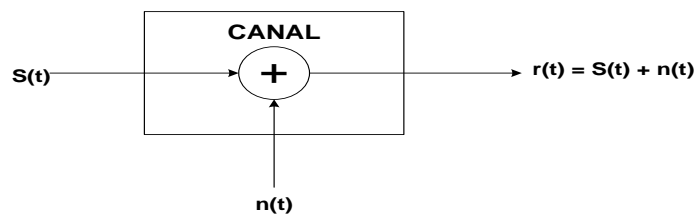


Fig. 1-3 Modelo de Canal con Ruido Aditivo [3]

La señal $S(t)$ es corrupta por un proceso de Ruido Aditivo $n(t)$. Físicamente, el proceso de ruido Aditivo puede venir desde componentes electrónicos y amplificadores al receptor del sistema de comunicación o desde interferencia encontrada en la transmisión (como en el caso de la transmisión de señales de radio). Si el ruido es introducido primeramente por componentes electrónicos al receptor, este puede ser caracterizado como ruido térmico. Este tipo de ruido es definido estadísticamente como un proceso de ruido Gaussiano, simplemente, el modelo matemático resultante para el canal es llamado canal de Ruido Aditivo Gaussiano AWGN (Ideal).

1.4 Evolución de las telecomunicaciones móviles

1.4.1 Global System for Mobile Communications

Al inicio de la década de los 90s GSM (Global System for Mobile Communications) inició un cambio sin precedentes en la manera de comunicarse de las personas. GSM, en el año 2010, era usado por más de tres mil millones de personas alrededor del mundo, esto se logró en parte por los avances en las tecnologías de comunicaciones y la reducción de los costos de operación y despliegue de estas tecnologías.

Una red GSM está dividida en tres subsistemas:

- La estación base (Base station subsystem, BSS), contiene todos los nodos y funcionalidades que son necesarias para conectar inalámbricamente todos los suscriptores a través de una interfaz de radio, usualmente llamada interfaz del aire.
- La red (Network subsystem, NSS), usualmente llamada como el núcleo de la red, el core, contiene todos los nodos y funcionalidades necesarias para conmutar las llamadas entre suscriptores.
- La red inteligente (The Intelligent Network Subsystem, IN) comprende las bases de datos SCP que agregan funciones adicionales a la red. Una de las funciones más importantes de la IN es la función de servicio prepago. [5]

1.4.2 General Packet Radio Service (GPRS) y EDGE

GSM fue diseñada inicialmente como una red de conmutación de circuitos, es decir todos los recursos para el establecimiento de la llamada eran reservados y utilizados al inicio de la llamada y nadie más podría utilizar esos recursos. Sin embargo con el crecimiento del Internet se hizo necesario poder transportar datos de una manera más eficiente entre los usuarios del GSM y así surgió el GPRS y el EDGE que utilizan sistemas de conmutación de paquetes, es decir, envían un mensaje e inmediatamente desocupan los recursos que utilizaron para dar paso a que otro usuario los utilice. [5]

1.4.3 Universal Mobile Telecommunications Systems (UMTS) y High-Speed Packet Access (HSPA)

Popularmente conocidas como redes 3G y 3.5G respectivamente, son el siguiente escalón en las telecomunicaciones móviles. En las tecnologías anteriores se usaban métodos de multiplexación por división de frecuencias y de tiempo, en 3G se utiliza Wide band Code Division Multiple Access (WCDMA), con esta técnica el ancho de banda fue incrementado significativamente respecto al GSM. [5]

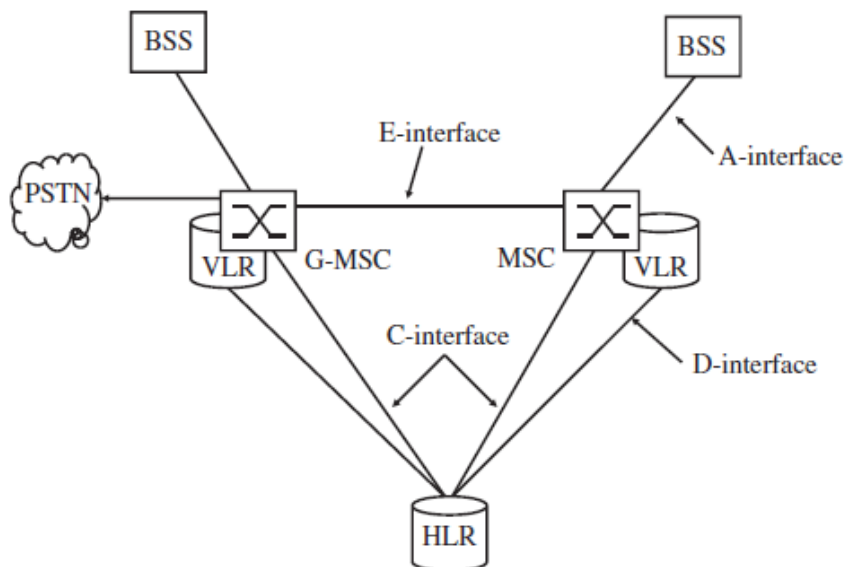


Fig. 1-4 Sistemas de una red GSM [5]

1.4.4 Long Term Evolution (LTE)

LTE se vuelve una necesidad debido al crecimiento de las aplicaciones que requieren conectarse a Internet, y al crecimiento de los usuarios que demandan este servicio. El desarrollo de LTE se centró en la interfaz del aire, se estableció una velocidad de descarga de 100 Mbps y una velocidad de subida de 50 Mbps. Se emplea OFDMA como esquema de acceso múltiple en la descarga y SC-FDMA en la subida, el ancho de banda pasa de 5MHz en WCDMA a un ancho de banda variable con valores comprendidos en los siguientes rangos: de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20MHz, la latencia se disminuye, en fin, estas y otras mejoras adicionales hicieron que el LTE alcanzara las velocidades planteadas.

Luego se hicieron unas mejoras al estándar de LTE, que están comprendidas en LTE rel9, LTE rel10 y LTE Advanced, LTE Advanced logra velocidades de transmisión de 300 Mbps, siendo el estándar actualmente más rápido en tecnologías móviles.

1.4.5 Redes 5G

Justo cinco años después de que los primeros teléfonos inteligentes 4G salieran al mercado, la industria de las telecomunicaciones ya se está preparando para el desarrollo de la tecnología 5G.

Cada una de las cuatro principales compañías de telefonía móvil a nivel nacional, en Estados Unidos, al igual que los fabricantes de chips para teléfonos inteligentes y las principales compañías de equipo de redes está trabajando para desarrollar una red con tecnología 5G para sus clientes. Se cree que 5G será una combinación de los sistemas actualmente desplegados, LTE y WiFi combinados en un sistema único y nuevo creada para nuevos requerimientos como una latencia virtualmente hecha cero. [6]

Existen muchos obstáculos significativos que todos los participantes de la industria tienen que resolver antes de que veas el pequeño símbolo 5G junto a las barras de señal en la pantalla de tu teléfono inteligente. Por ejemplo, aún no ha sido determinado qué es lo que la tecnología 5G significa, mucho menos cómo será y cuándo llegará aquí.

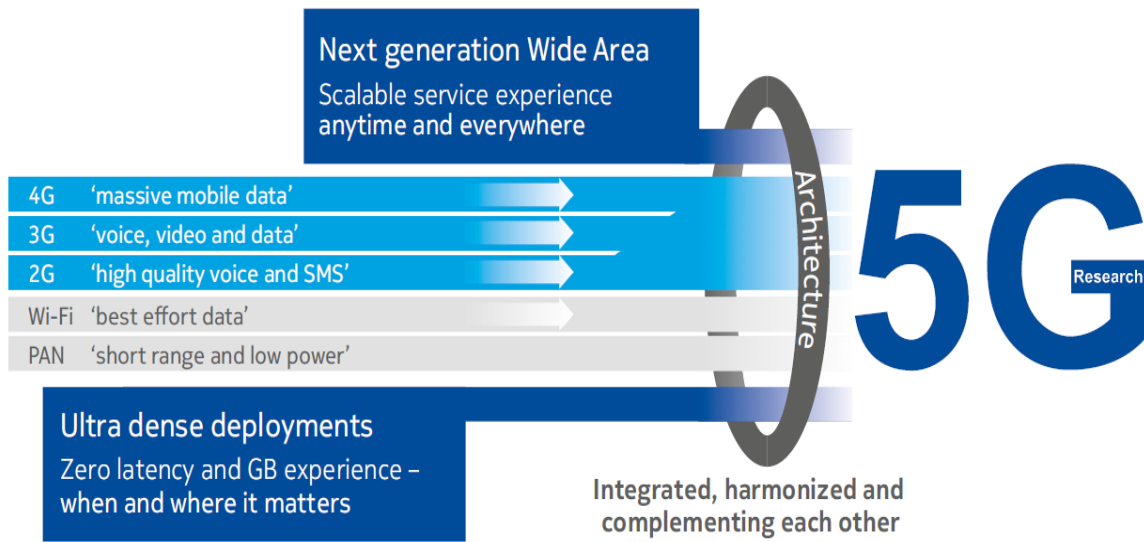


Fig. 1-5 Posible arquitectura de una red 5G. [6]

Pero a medida que los consumidores usan cantidades de banda ancha 4G que aumentan rápidamente cuando ven videos en 'streaming' en sus teléfonos, la tecnología 5G pronto se convertirá en una necesidad. [7]

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

CAPITULO 2

2 Long Term Evolution, LTE release 8

En este capítulo presentaremos con más detalle la tecnología LTE rel 8, en el capítulo anterior se presentó brevemente en que consiste esta tecnología, ahora la estudiaremos más a fondo a fin de comprender en qué consiste, su estructura y sus ventajas frente a sus predecesoras.

2.1 Long Term Evolution (LTE) release 8

Es un estándar de la norma 3GPP definida por unos como una evolución de la norma 3GPP UMTS (3G), y por otros como un nuevo concepto de arquitectura evolutiva (4G).

En 2004, 3GPP comenzó un estudio sobre la evolución a largo plazo de UMTS. El objetivo era mantener los sistemas de comunicaciones móviles de 3GPP competitivos en escalas de tiempo de 10 años y más allá, mediante la entrega de las altas velocidades de datos y latencias bajas que los futuros usuarios requieran.

El principal resultado del estudio sobre la evolución a largo plazo era una especificación de requisitos, los más importantes fueron los siguientes.

Que LTE rel 8 emitiera una velocidad de datos máxima de 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente. Este requisito se excedió en el sistema eventual, que ofrece velocidades de datos pico de 300 Mbps y 75 Mbps respectivamente. Para la comparación, la tasa de datos máxima en WCDMA, en la versión 6 de las especificaciones 3GPP, es de 14 Mbps en el enlace descendente y 5,7 Mbps en el enlace ascendente [2].

Hay que recordar, sin embargo, que estas velocidades de datos pico sólo se puede llegar en condiciones ideales, y son totalmente inalcanzables en cualquier escenario realista. Una mejor medida es la eficiencia espectral, que expresa la capacidad típica de una

célula por unidad de ancho de banda. En LTE rel 8 se requiere que soporte una eficiencia espectral de tres a cuatro veces mayor que la de la versión 6 de WCDMA en el enlace descendente y de dos a tres veces mayor en el enlace ascendente.

La latencia es otro tema importante, especialmente para aplicaciones de tiempo crítico como voz y juegos interactivos. Hay dos aspectos a considerar en esto. En primer lugar, el tiempo necesario para que los datos viajen entre el teléfono móvil y la red fija debe ser menos de cinco milisegundos, siempre que la interfaz de aire este des congestionada. En segundo lugar, los teléfonos móviles pueden funcionar en dos estados: un estado activo en el que se está comunicando con la red y un estado de espera de bajo consumo. Los requisitos establecen que un teléfono debe conmutar del modo de espera al estado activo, después de una intervención del usuario, en menos de 100 milisegundos.

También existen requisitos sobre la cobertura y la movilidad. LTE rel 8 está optimizado para celdas de tamaños de hasta 5 km, trabaja con rendimiento degradado hasta 30 km y es compatible con tamaños de celda de hasta 100 kilómetros. También se ha optimizado para velocidades móviles hasta 15 km/hr, funciona con un alto rendimiento hasta 120 km/hr y es compatible con velocidades de hasta 350 km/hr. Finalmente, LTE rel 8 está diseñado para trabajar con una variedad de diferentes anchos de banda, que van desde 1.4MHz hasta un máximo de 20 MHz.

La especificación de requisitos en última instancia condujo a un diseño detallado para la interfaz de aire LTE. En la siguiente tabla se resumen sus características técnicas clave, y los compara con los de WCDMA. [8]

Tabla 2-1 Comparación de WCDMA y LTE [8]

Feature	WCDMA	LTE rel 8
Esquema de acceso multiple	WCDMA	OFDMA y SC-FDMA
Frecuencia de reuso	100%	Flexible
Uso de MIMO	Desde rel. 7	Si
Ancho de banda	5MHz	1.4, 3, 5, 10, 15 y 20MHz
Duración de la trama	10ms	10ms
Intervalo de tiempo de transmisión	2 o 10ms	1ms
Modos de operación	FDD y TDD	FDD y TDD
Temporizador avanzado del enlace ascendente	No es requerido	Es requerido
Canales de transporte	Dedicado y compartido	Compartido
Uplink Power Control	Rápido	Lento

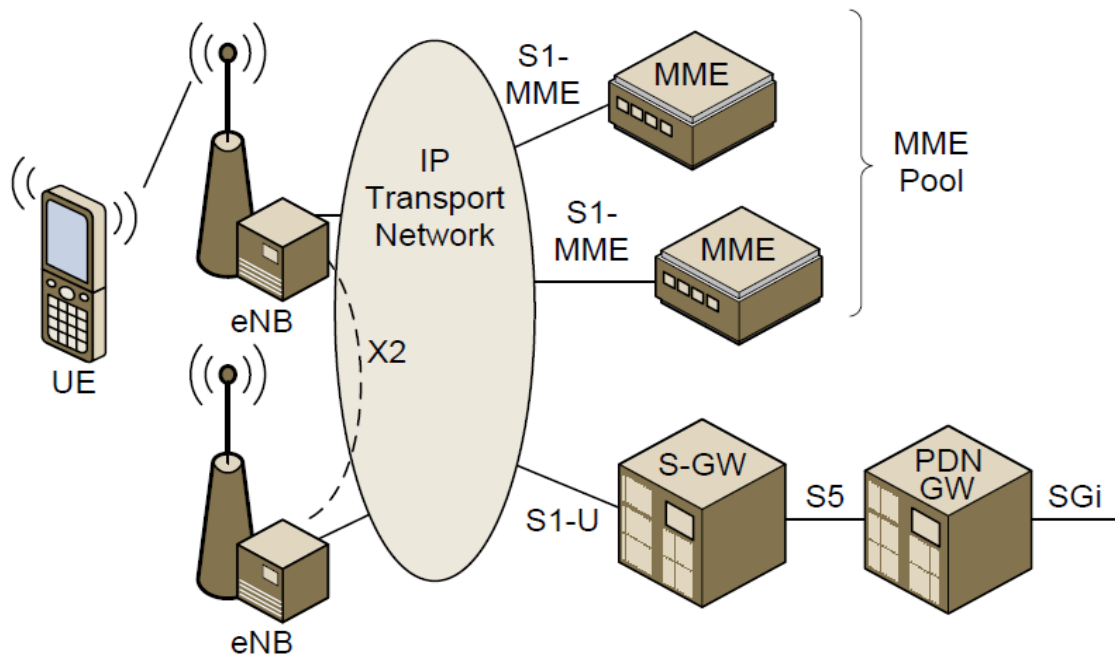


Fig. 2-1 Estructura de una red LTE rel 8 [9]

La arquitectura de una red LTE rel 8 consiste en el Radio Access Network o RAN y está compuesto de múltiples eNodeB, los cuales están configurados con múltiples sectores. Estos eNB se conectan mediante IP al Evolved Packet Core (EPC), estos consisten en múltiples MME (Mobility Management Entity), S-GW (Serving Gateway) y PDN-GW (Packet Data Network-Gateway). LTE soporta el agrupamiento de los MME, de manera que un eNB puede conectarse a varios MME's con el propósito de balancear las cargas y en caso de fallos. [9].

LTE rel8 utiliza 7 modos de transmisión: [10]

1. Transmission mode 1: Single-antenna transmission.
2. Transmission mode 2: Transmit diversity.
3. Transmission mode 3: Open-loop codebook-based precoding in the case of more than one layer, transmit diversity in the case of rank-one transmission.
4. Transmission mode 4: Closed-loop codebook-based precoding.
5. Transmission mode 5: Multi-user-MIMO version of transmission mode 4.

6. Transmission mode 6: Special case of closed-loop codebook-based precoding limited to singlelayer transmission.
7. Transmission mode 7: Release-8 non-codebook-based precoding supporting only single-layer transmission.

En la tabla 2-2 se muestran ñas frecuencias en las que trabaja LTE [2]

La arquitectura E-UTRAN presenta importantes diferencias con respecto a las redes de acceso UTRAN y GERAN. En la figura 2-2 se muestran un despliegue simple de ambas redes donde podemos observar las diferencias. [11]

Tabla 2-2 Bandas de operación de LTE [2]

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	$F_{UL\ low} - F_{UL\ high}$	$F_{DL\ low} - F_{DL\ high}$	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894MHz	FDD
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1452.9 MHz	1475.9 MHz – 1500.9 MHz	FDD
12	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
...			
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
...			
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD

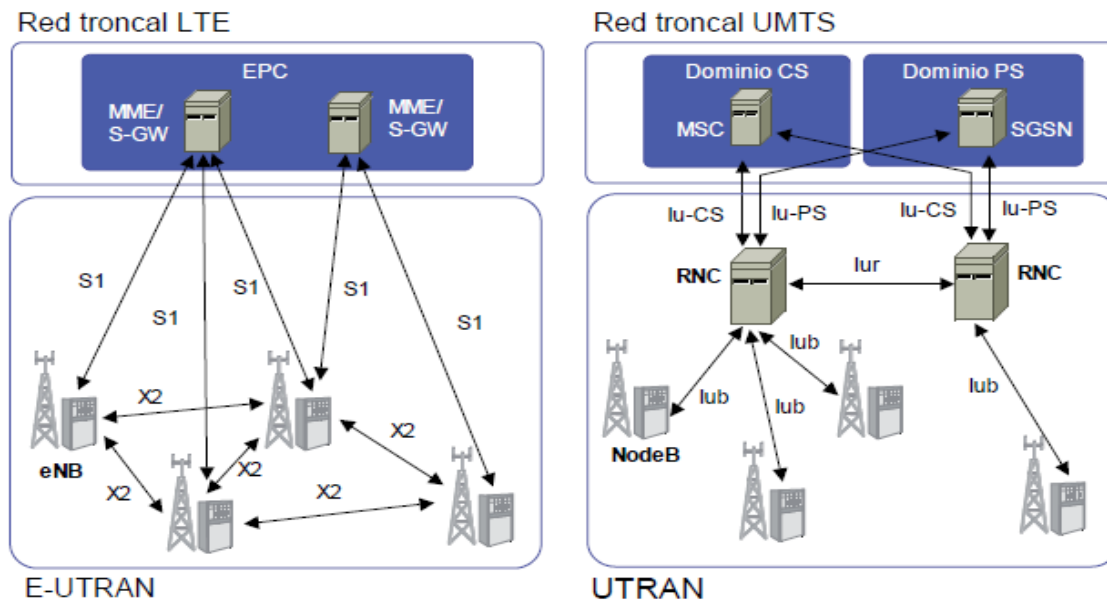


Fig. 2-2 Comparación entre una red LTE rel 8 y una red 3G [11]

Las redes de acceso anteriores a E-UTRAN se basan en una arquitectura jerárquica donde las funciones de la red de acceso se distribuyen en dos tipos de nodos: estaciones bases o NodeB y equipos controladores de estas estaciones base o RNC. En esta arquitectura jerarquizada, los equipos controladores albergan el plano de control de la interfaz de radio así como múltiples funciones del plano de usuario. Los NodeB se ocupan principalmente de la capa física y su operación se gestiona de forma remota desde los equipos controladores. Entre las estaciones se conectan mediante una interfaz llamada Iub, entonces la topología lógica que resulta es una topología estrella.

La topología E-UTRAN es una topología plana, lo que permite que el dimensionamiento de la red de acceso y de los equipos de la red troncal puede hacerse de forma más flexible permitiendo que el tráfico pueda ser balanceado a través de los troncales más adecuados, a diferencia de una estructura jerárquica como la de UTRAN donde la capacidad libre en otros nodos no puede ser aprovechada. También los ENodeB pueden conectarse entre sí, logrando una topología en malla. [11].

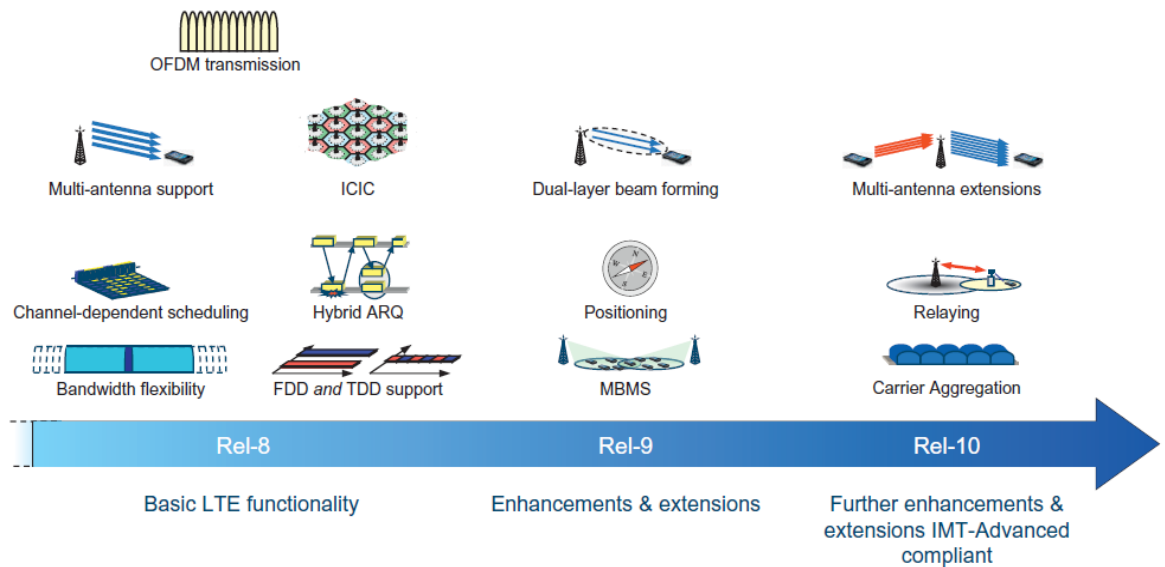


Fig. 2-3 Evolución del LTE [10]

2.2 LTE release 8 vs otros releases

La siguiente imagen nos muestra la evolución del LTE y sus diferentes funcionalidades que se han ido agregando en sus posteriores releases.

La tabla 2-3 nos muestra algunas de las diferencias entre LTE rel 8 y LTE Advanced, y se comparan con los requerimientos del para que una tecnología sea llamada 4G, como observamos el rel 8 no cumple con esta los requerimientos mínimos del estándar, y tiene problemas de eficiencia espectral en el enlace de subida, aunque al LTE rel. 8 comercialmente se le conoce como tecnología 4G.

La tabla 2-4 muestra una clasificación de los equipos móviles en dependencia de a que reléase del estándar de LTE pertenecen, al igual que sus capacidades.

Tabla 2-3 Comparación entre LTE rel 8 y LTE rel 10 e IMT Advanced

		LTE versión 8	LTE Advanced	IMT Advanced
Pico de velocidad de datos	Bajada	300 Mbit/s	1 Gbit/s	1 Gbit/s
	Subida	75 Mbit/s	500 Mbit/s	
Pico de la eficiencia del espectro [bit / (s Hz)]	Bajada	15	30	15
	Subida	3,75	15	6,75

Tabla 2-4 Categorías de teléfonos móviles [10]

	Category							
	Release 8/9/10					Release 10 only		
	1	2	3	4	5	6	7	8
Downlink peak rate (Mbps)	10	50	100	150	300	300	300	3000
Uplink rate (Mbps)	5	25	50	50	75	50	150	1500
Maximun downlink modulation	64 QAM							
Max. Number of layers for downlink spatial multiplexing	1	2			3	Signaled separately		

Los modelos más recientes de Samsung como el S7 EDGE y el Iphone 6s de Apple son de categoría 6 [12], lo que significa que los teléfonos apenas están llegando al nivel del Rel 10.

2.2.1 Codificación de Canal en LTE release 8

La historia de codificación comienza con el trabajo seminal de Claude Shannon [13] en "La teoría matemática de la comunicación." Se demostró que es posible transmitir datos sin errores, siempre y cuando la tasa de bits sea menor que la capacidad del canal. La ausencia de errores se consigue mediante el uso de códigos "apropiados". Shannon mostró que códigos (infinitamente largos) aleatorios pueden alcanzar dicha capacidad. Desafortunadamente, estos códigos no se pueden utilizar en la práctica debido al enorme esfuerzo que se requiere para su decodificación. Durante más de 50 años, el trabajo de los teóricos de codificación consistió principalmente en la búsqueda de códigos prácticos que se acercan al límite de Shannon, es decir, permitir que las comunicaciones con tasas cercanas a la capacidad del canal.

En la práctica la codificación de canal es utilizada en casi todas las comunicaciones digitales y especialmente en comunicaciones móviles. La codificación de canal implica que cada bit de información a ser transmitido es cubierto por varios bits de codificación.

Las clases más importantes de los códigos son: códigos de bloque, códigos convolucionales, códigos de Trellis, Turbo codes y Low Density Parity Check (LDPC). [13]

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

CAPITULO 3

3 Esquemas de modulación digital en LTE release 8

En este capítulo hablaremos más en detalle de los esquemas de modulación usados en LTE, cómo convergen con la codificación de canal y cómo es que estos esquemas van adaptándose al ambiente, al canal donde se está desarrollando el enlace.

3.1 Esquemas de modulación

Modulación engloba el conjunto de técnicas que se usan para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea además de mejorar la resistencia contra posibles ruidos e interferencias. Según la American National Standard for Telecommunications, (ANSI), la modulación es el proceso, o el resultado del proceso, de variar una característica de una onda portadora de acuerdo con una señal que transporta información. El propósito de la modulación es sobreponer señales en las ondas portadoras.

Básicamente, la modulación consiste en hacer que un parámetro de la onda portadora cambie de valor de acuerdo con las variaciones de la **señal moduladora**, que es la información que queremos transmitir.

En la modulación digital la información digital se codifica como una variación de los parámetros de una señal sinusoidal, llamada la señal portadora. Típicamente, para los sistemas de modulación analógica, la frecuencia portadora es mucho mayor que la frecuencia del mensaje. La modulación digital se basa en la variación de la amplitud, fase, o frecuencia de la sinusoidal portadora, o alguna combinación de estos parámetros. [4]

LTE utiliza los siguientes esquemas de modulación:

- QPSK
- 16QAM
- 64QAM

3.1.1 Modulación M-ARY

M-ario es un término derivado de la palabra binario, la M es solo un dígito que representa el número de condiciones posibles en un esquema en un esquema específico. Las dos técnicas FSK y BPSK son sistemas binarios, donde solo existe dos condiciones posibles de salida, una representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico, por tanto es un sistema M-ario donde $M=2$. En modulaciones digitales es ventajoso codificar a un nivel más alto que el binario, por ejemplo un sistema PSK, con cuatro posibles fases de salida es un sistema M-ario en donde $M=4$. Las técnicas M-arias se utilizan para mejorar la inmunidad al ruido aunque se aumente la demanda de potencia, además que son aplicadas cuando el ancho de banda es un factor limitado en el canal de comunicación

3.1.2 M-QAM

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM), es una forma de modulación digital en donde la información digital está contenida, tanto en la amplitud como en la fase de la portadora transmitida. Es una técnica de modulación digital avanzada que transporta datos, mediante la modulación de la señal portadora de información tanto en amplitud como en fase. Esto se consigue modulando una misma portadora, desfasando 90° la fase y la amplitud. [14]. La señal modulada en QAM está compuesta por la suma lineal de dos señales previamente moduladas en Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida.

Se asocian a esta tecnología aplicaciones tales como:

- Modems telefónicos para velocidades superiores a los 2400bps.
- Transmisión de señales de televisión, microondas, satélite (datos a alta velocidad por canales con ancho de banda restringido).

- Modulación con Codificación Reticulada, que consigue velocidades de transmisión muy elevadas combinando la modulación con la codificación de canal.
- Módems ADSL que trabajan a frecuencias comprendidas entre 24KHz y 1104KHz, alcanzándose velocidades de datos de hasta 9 Mbps.

LTE reléase 8, que es la versión de LTE con la que trabajamos utiliza los esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64 QAM, estos ya son parámetros definidos en este release, y en un enlace LTE se usan cualquiera de los esquemas en función de la calidad del enlace definido por el parámetro CQI se adapta a uno de estos tres esquemas de modulación digital

El objetivo de utilizar los esquemas de modulación es primeramente poder acondicionar los bits del mensaje para que puedan viajar por el medio. También para poder transmitir más símbolos en una misma señal.

3.1.3 QPSK

La modulación por desplazamiento cuadrafásica (QPSK, por sus siglas en inglés) se refiere a una técnica para variar la fase de una onda portadora mediante la aplicación de una señal digital, de modo que pueda llevar una señal en las transmisiones de radio o televisión.

En su forma más simple, la modulación digital de fase, o fase de modulación por desplazamiento, cambia la fase de la onda portadora mediante el uso de datos digitales para cambiar entre dos señales de la misma frecuencia, pero de fase opuesta. Sin embargo, el número de desplazamientos no está limitado a solo dos estados y en la modulación QPSK la onda portadora se somete a cuatro cambios de fase, correspondientes a 0, 90, 180 y 270 grados de posición dentro de la forma de onda.

En la fig 3-1, 3-2 y 3-3 se muestran las constelaciones ideales de los esquemas de modulación: [15]

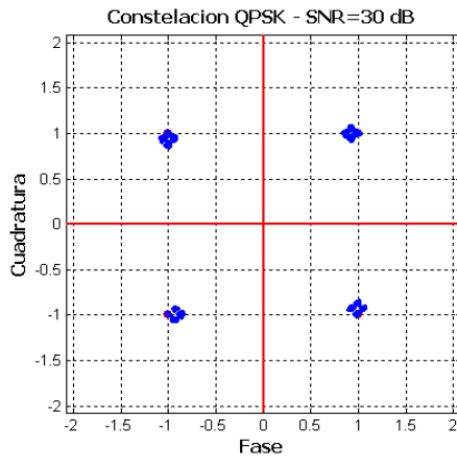


Fig. 3-1 Constelación QPSK [15]

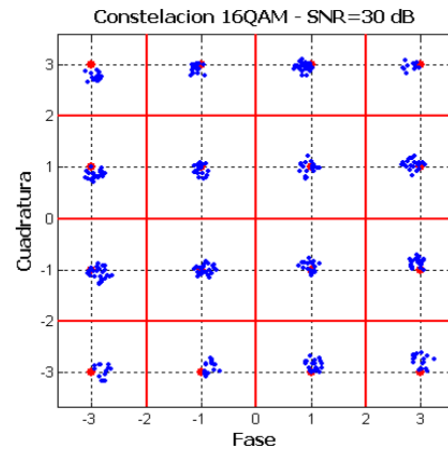


Fig. 3-2 Constelación 16QAM [15]

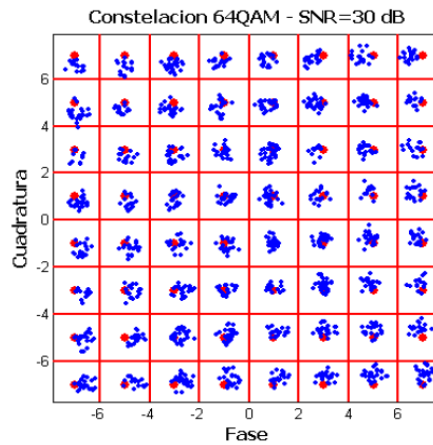


Fig. 3-3 Constelación 64QAM [15]

3.2 Adaptive Modulation and Coding

Es una técnica que se utiliza en telecomunicaciones que mezcla tanto la codificación de canal como la modulación, esto con el fin de elegir la mejor combinación posible entre codificación de canal y modulación que permita un BER bajo y una velocidad de transmisión alta, dependiendo del estado del canal.

En LTE rel 8, que es el estándar que estamos trabajando, se determina el CQI (Channel quality indicator), este CQI es un indicador de 4 bits que indica la velocidad máxima de transmisión que el móvil puede manejar con un error del 10% o menor. El CQI depende

del SINR, ya que las velocidades altas de transmisión solo se pueden alcanzar con un SINR alto, sin embargo también depende de la capacidad del receptor, ya que un receptor avanzado puede procesar los datos recibidos aun en presencia de un bajo SINR.

La tabla 3-1 muestra como el CQI es interpretado en términos de modulación y codificación en un enlace de descarga.

La BTS utiliza el CQI recibido para realizar sus cálculos de que esquema de modulación y cual codificación de canal utilizar.

Al utilizar el CQI el sistema puede determinar el estado del canal y de esta forma ajustar automáticamente sus esquemas de modulación y codificación de canal en función de entregar la mejor velocidad de transmisión que se pueda en el momento.

Tabla 3-1 Esquemas de modulación y codificación [2].

CQI	ESQUEMA DE MODULACION	CODING RATE	BITS DE INFORMACIÓN POR SIMBOLO	SINR (dB)
0	N/A	0	0.00	N/A
1	QPSK	0.0762	0.15	-6.7
2	QPSK	0.1172	0.23	-4.7
3	QPSK	0.1885	0.38	-2.3
4	QPSK	0.3008	0.6	0.2
5	QPSK	0.4385	0.88	2.4
6	QPSK	0.5879	1.18	4.3
7	16-QAM	0.3691	1.48	5.9
8	16-QAM	0.4785	1.91	8.1
9	16-QAM	0.6016	2.41	10.3
10	64-QAM	0.4551	2.73	11.7
11	64-QAM	0.5537	3.32	14.1
12	64-QAM	0.6504	3.9	16.3
13	64-QAM	0.7539	4.52	18.7
14	64-QAM	0.8525	5.12	21
15	64-QAM	0.9258	5.55	22.7

3.3 Algoritmo de elección del MCS

En resumen el algoritmo se encarga de enviar bits de control, en base a esta información de control calcula el CQI y referenciando ese CQI con la tabla de esquemas de modulación y codificación elige el MCS que corresponde a ese momento y luego envía la información, este proceso lo realiza para cada subtrama que va a enviar.

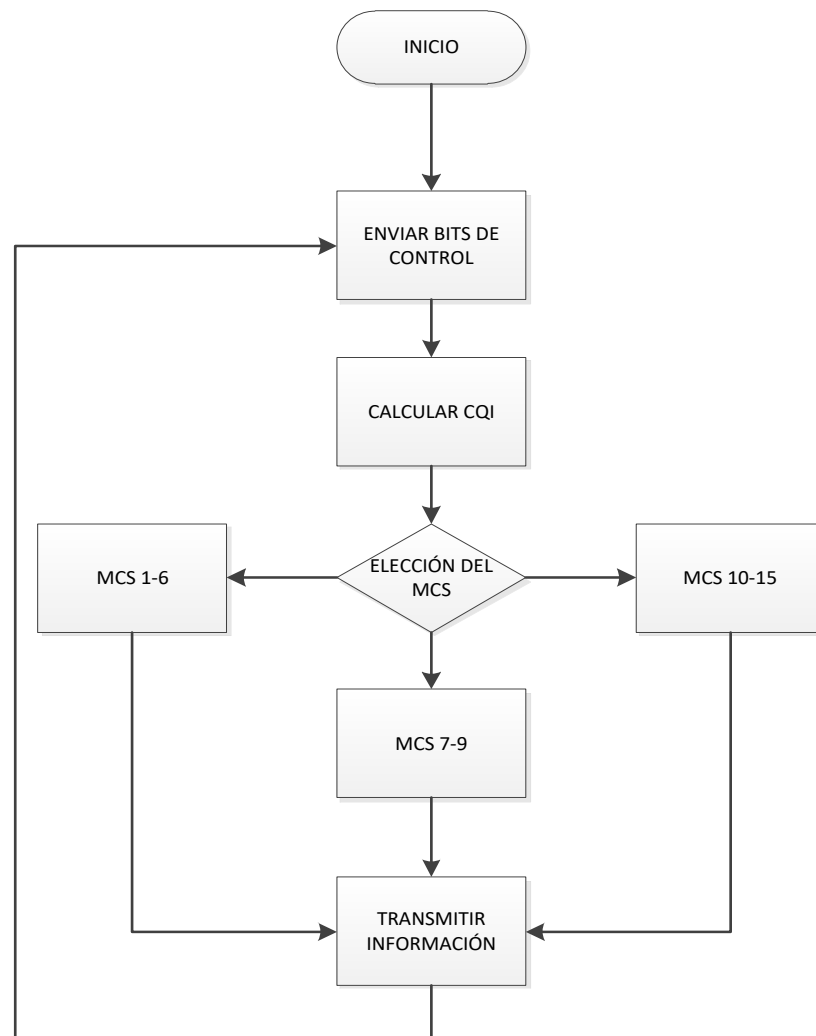


Fig. 3-4 Diagrama de bloques del algoritmo de adaptatividad

CAPITULO 4

4 Otras técnicas usadas en LTE release 8

En este capítulo hablaremos acerca de las otras técnicas que utiliza LTE rel 8, los MCS por sí solos no se pueden estudiar debido a que LTE además de los MCS utiliza otras técnicas que en combinación con los MCS mejoran aún más la calidad del enlace. No es lo mismo estudiar los MCS con estas técnicas que sin ellas.

4.1 Modelos de canal en LTE release 8

Los canales inalámbricos se caracterizan por la disponibilidad de distintos caminos de propagación entre el transmisor y el receptor, además del camino directo entre ellos (LOS, por sus siglas en inglés), el cual en ocasiones puede ni siquiera existir. Estos caminos se forman por la reflexión, la difracción, el scattering o cualquier otro efecto de propagación. Al existir estos distintos caminos distintas versiones de la información transmitida llegan al receptor, estas versiones pueden variar en potencia, y tener retrasos en el tiempo o en fase. Debido a que las señales son correlacionadas en el tiempo, el canal AWGN no es el más preciso para representar estas transmisiones. En general un buen modelo de canal puede ser de dos formas atenuaciones de señal o large scale fading o small scale fading. [16].

La pérdida de propagación y el shadowing son los efectos más significativos del large-scale fading, y el small-scale fading se caracteriza por el desvanecimiento por multitrayectoria y la dispersión en el tiempo debido a la movilidad. Los efectos de la multitrayectoria se pueden englobar en dos, frequency-selective fading o flat fading.

Cuando la señal recibida por las distintas trayectorias es analizada en el dominio de la frecuencia se observan distintos patrones en dependencia de la frecuencia del

modulador, a esto se le llama frequency-selective fading. En el flat fading observamos que la afectación es pareja en todo el dominio de la frecuencia.

La cantidad de desvanecimiento selectivo depende del ambiente, habiendo menos desvanecimiento selectivo en celdas más pequeñas que en celdas grandes y en ambientes con pocas obstrucciones y potenciales reflectores, como en ambientes rurales.

Hay que tener en cuenta que la dispersión en tiempo de un canal de radio es equivalente a la respuesta en frecuencia de un canal de frequency selective.

La diferencia entre ruido e interferencia es que la interferencia, en contraste al ruido, es que típicamente tiene una estructura lo que la hace, con algunas excepciones, predecible y por ende es posible suprimirla o removerla completamente.

El canal de desvanecimiento por trayectos múltiples se define por una combinación de un perfil de retardo de trayectos múltiples y una frecuencia Doppler máxima, que puede ser 5, 70 o 300 Hz. El estándar de LTE definido por el 3GPP en su recomendación técnica 36.104 especifica tres tipos de canal con desvanecimiento, el Extended Pedestrian A (EPA), el Extended Vehicular A (EVA) y el Extended Typical Urban (ETU).

La ecuación 1 [17] es la respuesta al impulso de un canal MIMO variante en el tiempo.

$$\mathbf{H}(t; \tau) = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n(t; \tau) \quad (1)$$

Donde:

t: tiempo

τ : delay

N: numero de trayectos

n: Indice de trayecto

Esta ecuación proviene del modelo Tapped delay line, los τ son tiempos que se obtienen de mediciones empíricas en el campo. Para LTE rel8 se especifican ciertos tiempos, ligados a sus respectivas potencias recibidas en esos instantes [2]. Dichos taps se observan para cada modelo de canal en las tablas 4-1, 4-2, 4-3:

Tabla 4-1 Path Gains y Time Delays EPA

Excess tap delay (ns)	Relative power (dB)
0	0
30	-1.0
70	-2.0
90	-3.0
110	-8.0
190	-17.2
410	-20.8

Tabla 4-2 Path Gains y Time Delays EVA

Excess tap delay (ns)	Relative power (dB)
0	0
30	-1.5
150	-1.4
310	-3.6
370	-0.6
710	-9.1
1090	-7.0
1730	-12.0
2510	-16.9

Tabla 4-3 Path Gains y Time Delays ETU

Excess tap delay (ns)	Relative power (dB)
0	-1.0
50	-1.0
120	-1.0
200	0
230	0
500	0
1600	-3.0
2300	-5.0
5000	-7.0

En este trabajo se utiliza la función `comm.mimochannel` en la cual se introducen los taps anteriores mas el efecto Doppler para simular cada efecto del canal.

El efecto doppler es el aparente cambio de frecuencia debido a la velocidad a la que se transporta el terminal.

El efecto doppler está definido por la ecuación 2:

$$f_d = \frac{v}{c} \times f_c \quad (2)$$

Dónde:

f_d : Dopple shift

v : velocidad del términoinal

c : velocidad de la luz

f_c : frecuencia de la portadora

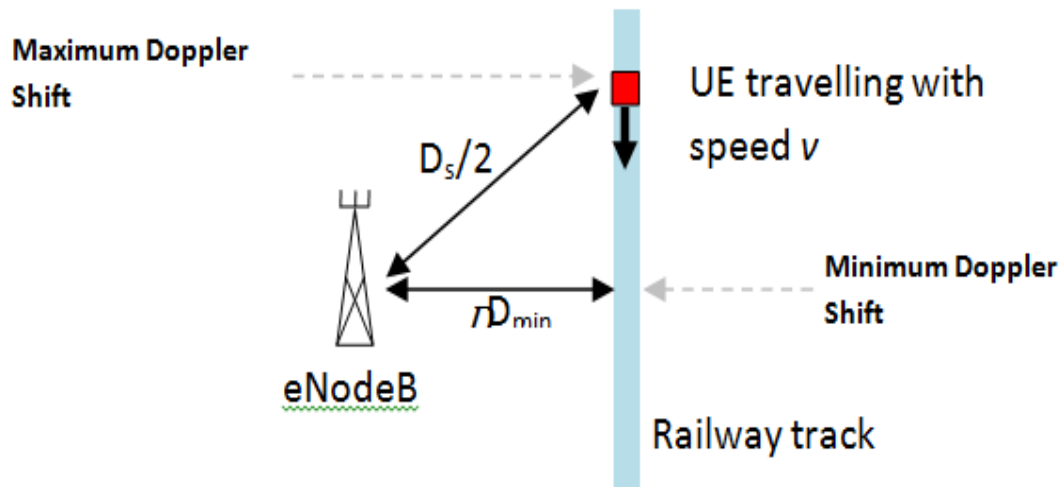


Fig. 4-1 High speed train condition. [18]

4.2 OFDM

Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) es un esquema de modulación que es especialmente adecuado para la transmisión de alta velocidad de datos en entornos de retardo dispersivo. Convierte un flujo de datos de alta velocidad en un número de corrientes de baja velocidad que se transmiten a través de canales de banda estrecha en paralelo, que pueden ser fácilmente ecualizados.

A medida que aumenta la velocidad de datos requeridos, la duración del símbolo T_s tiene que llegar a ser muy pequeña con el fin de lograr la velocidad de datos requerida, y el ancho de banda del sistema se vuelve muy largo. Ahora, la dispersión y retardo de un canal inalámbrico es dado por naturaleza; sus valores dependen del entorno, pero no del sistema de transmisión. Por lo tanto, si la duración del símbolo se vuelve muy pequeña, entonces la respuesta de impulso (y por tanto la longitud requerida de la ecualizador) se hace muy larga en términos de duraciones de símbolos. El esfuerzo computacional de una ecualización larga muy grande, y la probabilidad de la inestabilidad aumenta. OFDM, por otro lado, aumenta la duración del símbolo en cada uno de sus portadores en comparación con un sistema de portadora única, y por lo tanto puede tener un ecualizador muy simple para cada sub-portadora. [13]

Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) lo que hace es en lugar de enviar la información como un flujo único, la divide la información en varias sub-portadoras paralelas, y envía cada sub-portadora en una frecuencia diferente. Si la tasa total de datos sigue siendo la misma, entonces la velocidad de datos en cada sub-portadora es menor que antes, por lo que la duración del símbolo es más larga. Esto reduce la cantidad de ISI, y reduce la tasa de error [8]. OFDM es un caso especial de la transmisión con múltiples portadoras.

OFDM crea una matriz cuyos elementos son símbolos modulados provenientes del modulador. En su representación de 2D, el eje Y de la malla representa los subcarriers alineados en frecuencia y el eje X representa el símbolo de OFDM alineados en el tiempo. OFDM es el esquema de transmisión adoptado por el 3GPP LTE y WIMAX.

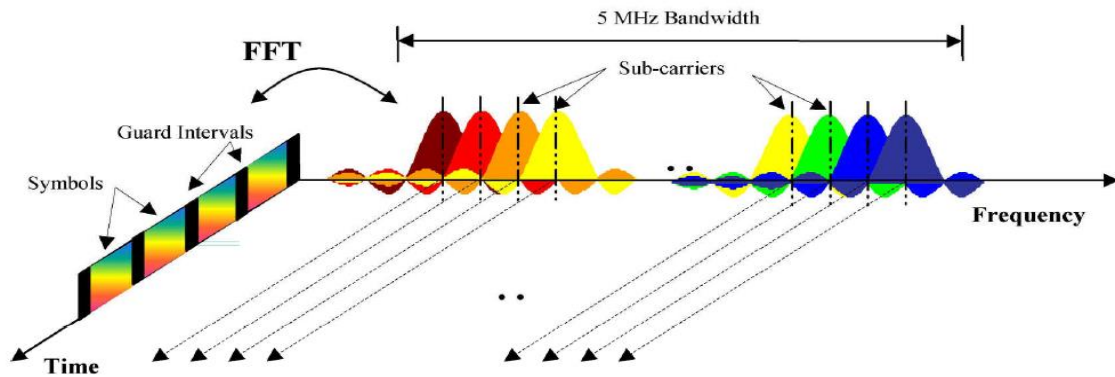


Fig. 4-2 Representación tiempo-frecuencia de una señal OFDM [19]

Para comprender el posicionamiento de los datos en la malla de OFDM es necesario entender la manera en la que LTE define una trama, subtrama y un slot de tiempo. Cada trama de LTE tiene una duración de 10ms, y está compuesta de 10 subtramas de 1ms y cada subtrama está compuesta de dos slots de tiempo de 0.5ms. Cada Slot está compuesto de 7 símbolos de OFDM.

La colocación de los datos en la malla de OFDM depende de tres factores: el índice del subcarrier, el índice del símbolo de OFDM y el índice de una subtrama de 1ms entre la trama de 10ms. La imagen 4-3 muestra cómo se colocan los distintos tipos de información en una malla. La tabla 4-4 muestra la cantidad de resource blocks por ancho de canal.

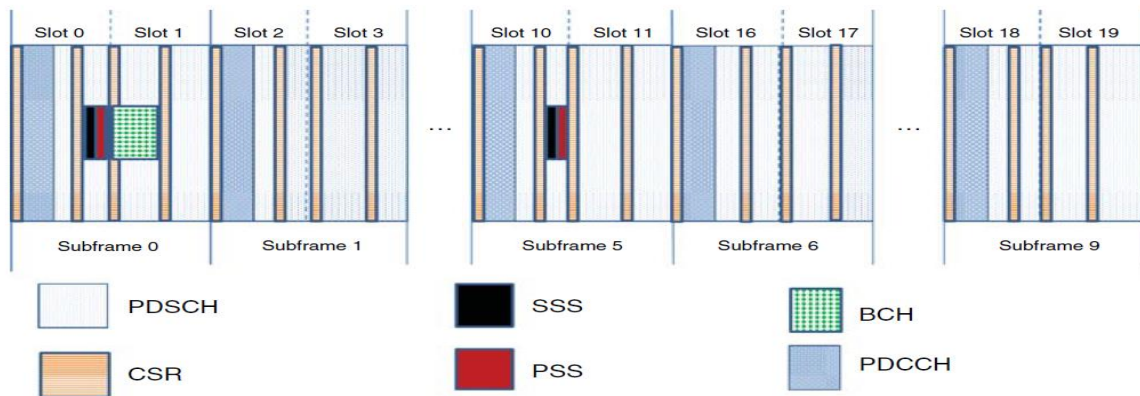


Fig. 4-3 Resource Blocks [16]

Tabla 4-4 Número de resource blocks por ancho de banda en LTE [19]

Channel Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Number of Resource Blocks	6	15	25	50	75	100

4.3 MIMO

El uso de múltiples antenas en el transmisor y en el receptor se conoce popularmente como MIMO (ver imagen 4-4, multiple-input multiple-output) se ha vuelto muy usado en la última década debido a sus poderosas capacidades de mejorar las comunicaciones inalámbricas. En un canal de comunicaciones se tiene predominantemente el desvanecimiento por multitrayectoria. La multitrayectoria es el efecto ocasionado en la señal recibida debido a cambios en los ángulos de fase o retrasos en la llegada de la señal o cambios en la frecuencia.

Podemos observar el desempeño esperado de MIMO en la figura 4-5, donde observamos la velocidad de transmisión de datos vs el SNR de la señal recibida, en un canal de 100 kHz, para un sistema de $M \times M$ antenas, la respuesta del canal es considerada constante. La ecuación 3 [20] calcula la capacidad de un canal MIMO.

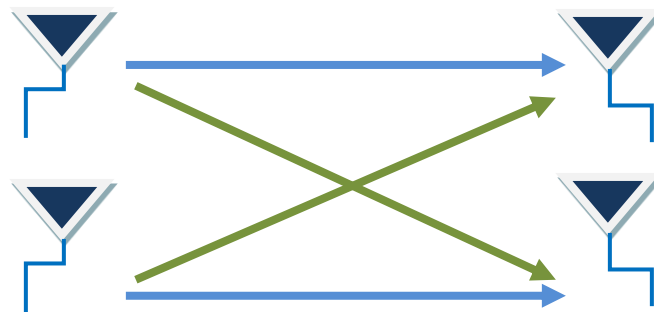


Fig. 4-4 MIMO [20]

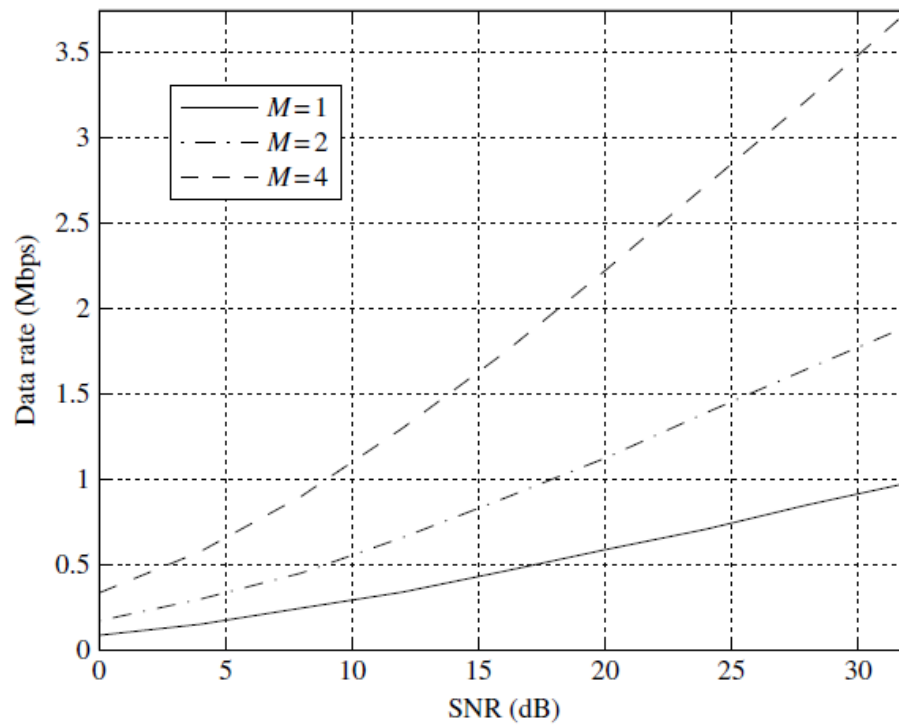


Fig. 4-5 Performance de MIMO [16]

$$C_{MIMO} = \log_2 \left(I_n + \frac{SNR}{M} + H^H \right) bps/Hz \quad (3)$$

Donde:

I_n : Matriz de identidad

$(\dots)^H$: conjugado traspuesto de la matriz

c : número total de las antenas transmisoras

H : Matriz normalizada de la respuesta del canal

MIMO se utiliza en varias tecnologías de telecomunicaciones, como:

- WI-FI: en el estándar 802.11n, logrando velocidades teóricas de hasta 600Mbps.
- WIMAX: Esta tecnología es muy similar a LTE, de hecho usan los mismos MCS, con diferencias en los tiempos de reacción.

4.3.1 MIMO en LTE

Desde el inicio en el estándar de LTE fue concebido para utilizar técnicas de múltiples antenas. Al utilizar MIMO, es necesario el uso de múltiples antenas para permitir que los diferentes caminos por multitrayectoria puedan ser distinguidos. Si bien es relativamente fácil de agregar más antenas de una estación base (eNB), lo mismo no puede decirse de los teléfonos móviles, en los que las dimensiones del equipo (UE), limitan el número de antenas que se puedan colocar al menos con media longitud de onda de diferencia.

Los principales objetivos al utilizar múltiples antenas son:

- Mejorar el SINR
- Compartir el SINR

El primero se utiliza en escenarios con bajo SINR, consiste en direccionar el haz de las antenas en la misma dirección con ajustes de fase, como el Beamforming, de manera que en el receptor se obtenga una señal que es la suma de las señales, mientras que el segundo se utiliza en escenarios con un alto SINR, de manera que ese SINR se pueda compartir entre todas las antenas. [21]

La más común es la diversidad en la cual se emplean múltiples antenas para transmitir el mensaje en el transmisor, el receptor o bien en ambos. Esta también la multiplexación espacial en la cual se transmiten diferentes mensajes a través de diferentes antenas en el transmisor y el receptor.

4.3.1.1 Diversidad

Recibir diversidad es la técnica más utilizada en enlaces de subida, en esta el eNode B utiliza dos antenas para recibir dos copias del mismo mensaje. La señal transmitida llega

a la antena con diferentes ángulos pero esto se puede arreglar utilizando la estimación del canal para cada antena.

También se puede transmitir con diversidad, en esta técnica se utilizan dos o más antenas para transmitir el mismo mensaje, sin embargo existe un problema con esta técnica y es que existe el riesgo de que las señales lleguen a interferirse provocando que se anulen, para evitar esto se utiliza la diversidad de lazo cerrado. Esta consiste en que la señal se envía como está previsto pero se agrega un cambio de fase en una de ellas o bien en ambas, para decidir qué cambio de fase aplicar el sistema primero calcula en el receptor el “precoding matrix indicator” que es el que determinará qué cambio en los ángulos se realizará, y luego esta información se envía al transmisor.

Esta técnica de lazo cerrado no es muy eficiente cuando los terminales móviles se mueven a gran velocidad, porque se introducen retrasos en los PMI, porque para cuando el transmisor compute el PMI este ya será inadecuado.

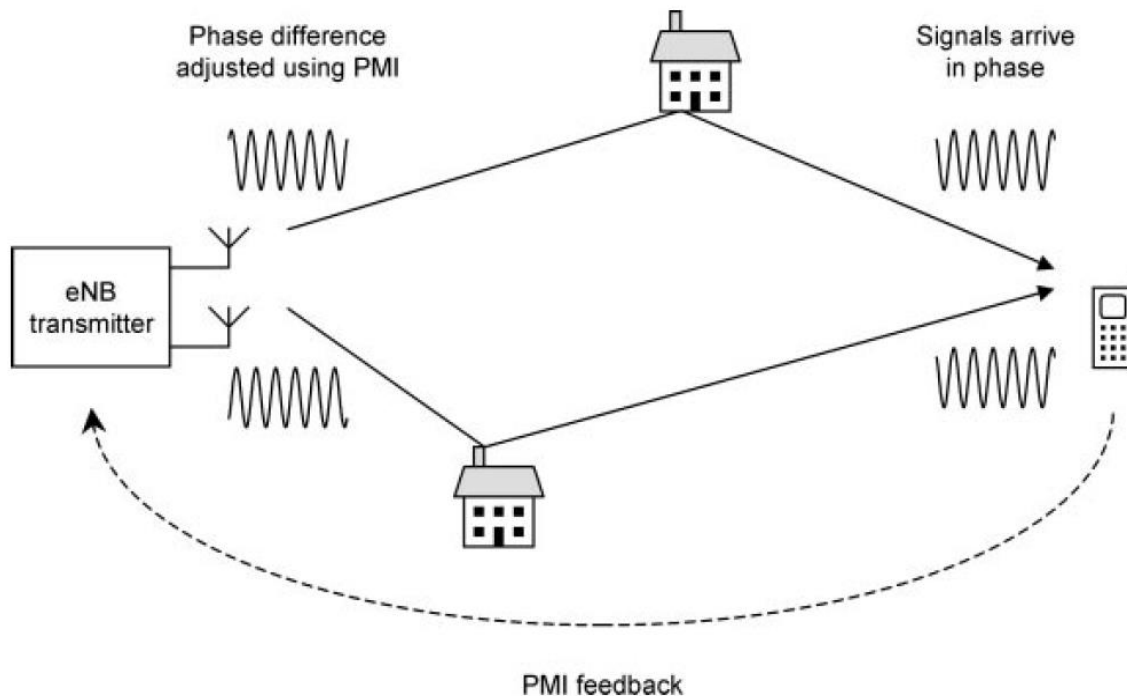


Fig. 4-6 Close loop diversidad. [16]

También está la técnica de transmitir diversidad con lazo abierto, es decir no se envía el PMI hacia el transmisor, se utiliza la técnica de Alamouti [22], la cual consiste en transmitir primero S1 por la antena 1 y S2 por la antena 2, luego retransmitir S1 por la antena 2 y S2 por la antena 1. Luego se resuelve un sistema de ecuaciones y de esta manera obtener los dos símbolos enviados.

4.3.1.2 Multiplexación espacial

Esta técnica consiste en enviar un símbolo distinto por cada antena del transmisor logrando aumentar la velocidad de transmisión al tener enlaces paralelos entre sí. En un sistema de NT antenas en el transmisor y NR antenas en el receptor conocido como sistema de multiplexación espacial de NT X NR la velocidad máxima de transmisión será igual al $\min(NT, NR)$.

En un sistema de 2x2, en el transmisor el mapeador de las antenas toma dos símbolos y los transmite cada uno por una antena simultáneamente, de esta manera se duplica la velocidad de transmisión. Los símbolos que se transmiten pueden ser escritos como se muestra a continuación:

$$y_1 = H_{11}x_1 + H_{12}x_2 + n_1 \quad (4)$$

$$y_2 = H_{21}x_1 + H_{22}x_2 + n_2 \quad (5)$$

Donde x_1 y x_2 son las señales enviadas desde las dos antenas, y_1 y y_2 son las señales que llegan a las antenas receptoras, n_1 y n_2 representan el ruido y la interferencia y H_{ij} expresa la manera en la que los símbolos son atenuados y cambiados de fase mientras viajan hacia la antena receptora i desde la antena transmisora j . En general estos valores son números complejos, donde las partes reales e imaginarias son las amplitudes y los componentes en cuadratura.

Existen dos tipos de multiplexación espacial, close loop spatial multiplexing y open loop spatial multiplexing.

Existen unos problemas en la implementación de multiplexación espacial y es que: en LTE rel8 se utilizan hasta un máximo de 4 antenas en el transmisor y 4 antenas en el receptor, las antenas, tanto en el transmisor como en el receptor deben de estar separadas al menos por algunas longitudes de ondas o estar polarizadas de manera diferente ya que de estar muy cerca entonces los elementos del canal H_{ij} se vuelven muy similares y esta técnica se vuelve inservible.

Algo similar sucede en situaciones donde hay línea de vista ya que los elementos se vuelven muy similares, en cambio sin LoS y con mucha multitrayectoria estos elementos difieren mucho y se puede emplear multiplexación. La figura 4-7 muestra los principios básicos de la multiplexación espacial:

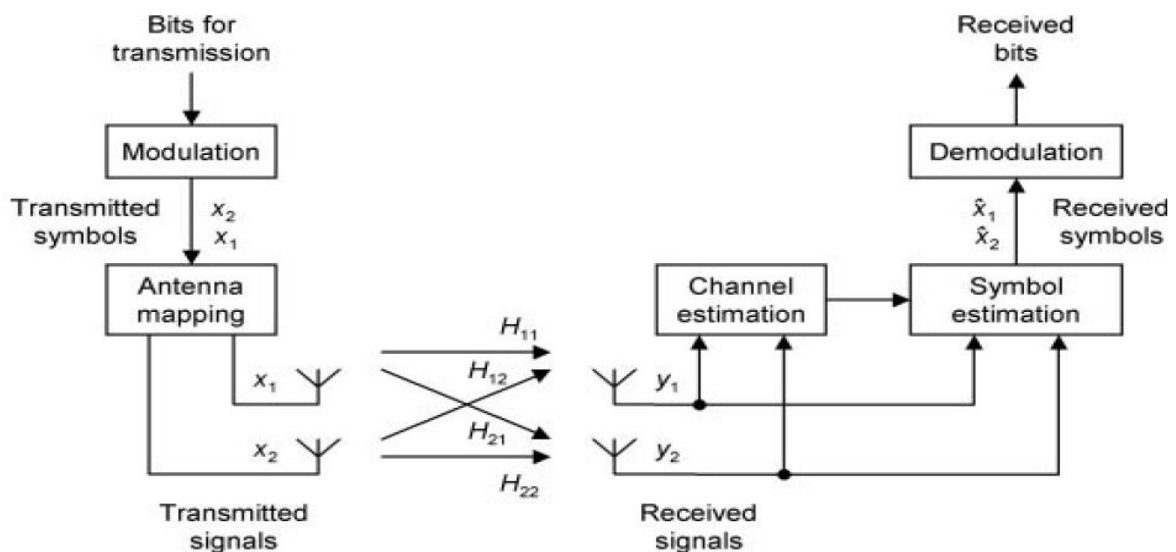


Fig. 4-7 Esquema de transmisión de Multiplexación espacial [16]

Como mencionamos anteriormente estas técnicas se utilizan bajo diferentes circunstancias, La diversidad se utiliza cuando el SINR es alto entonces se transmite el mismo símbolo por ambas antenas, también cuando hay LoS entre el móvil y el eNodeB. La multiplexación se usa si el SINR es bajo entonces permite enviar por cada antena un símbolo distinto haciendo que la velocidad de transmisión se duplique.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

CAPITULO 5

5 Análisis y presentación de resultados:

En este trabajo monográfico se llevará a cabo un estudio de tipo Comparativo y observacional, en el que se podrán observar las diferentes velocidades de transmisión en función del comportamiento del esquema de modulación utilizado de tres tipos (QPSK, 16QAM y 64QAM) y las condiciones del canal, que podrán ser observadas por medio de la implementación por simulación usando MATLAB®. Ver en anexo los códigos principales de estas simulaciones.

5.1 MATLAB

Es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación. Usando MATLAB®, puedes analizar los datos, desarrollar algoritmos y crear modelos y aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones integradas de matemáticas le permiten explorar múltiples enfoques y llegar a una solución más rápida que con las hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como C / C++ o Java™. Se puede utilizar MATLAB para una gama de aplicaciones, incluyendo el procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imágenes y vídeo, sistemas de control, prueba y medición, las finanzas computacionales, y la biología computacional. Más de un millón de ingenieros y científicos en la industria y la academia utilizan MATLAB® como lenguaje del cálculo técnico.

Para estas simulaciones y análisis se tomó como base las funciones creadas por Houman Zarrinkoub en el libro Understanding LTE with MATLAB from mathematical modeling to simulation and prototyping.

5.2 Simulaciones

En este trabajo simularemos un enlace de descarga con arreglos de antenas de 2x2 utilizando modulación digital, los esquemas del estándar LTE rel 8, modulación y codificación de canal adaptativos basándose en las mediciones del CQI.

En estos resultados se muestran valores promedios, es decir, se transmitieron un millón de bits, y en dependencia de las condiciones del canal son necesarias X cantidad de tramas para enviar esos bits, y lo que se muestra es el promedio de los resultados obtenidos en esas X cantidad de tramas utilizadas.

En la tabla 5-1 se muestran los parámetros de simulación utilizados.

5.3 Simulaciones y análisis de resultados

Para el análisis de los resultados de las simulaciones hemos considerando primeramente un escenario con con canal destructivo adaptativo y luego un ejemplo cuando no se usa la adaptación.

Como mencionamos antes, nos ayudaremos del software de MATLAB para realizar las simulaciones pertinentes. En anexos en un CD se proveen todos los códigos usados y modificados de Matlab para sustentar la monografía.

Tabla 5-1 Parámetros de simulación

Parámetro	Multiplexación Espacial	Diversidad
MIMO	2x2	2x2
Número de bits transmitidos	1000000	1000000
Ancho de banda del canal	20MHz	20MHz
Canal	EPA, EVA Y ETU	EPA, EVA Y ETU

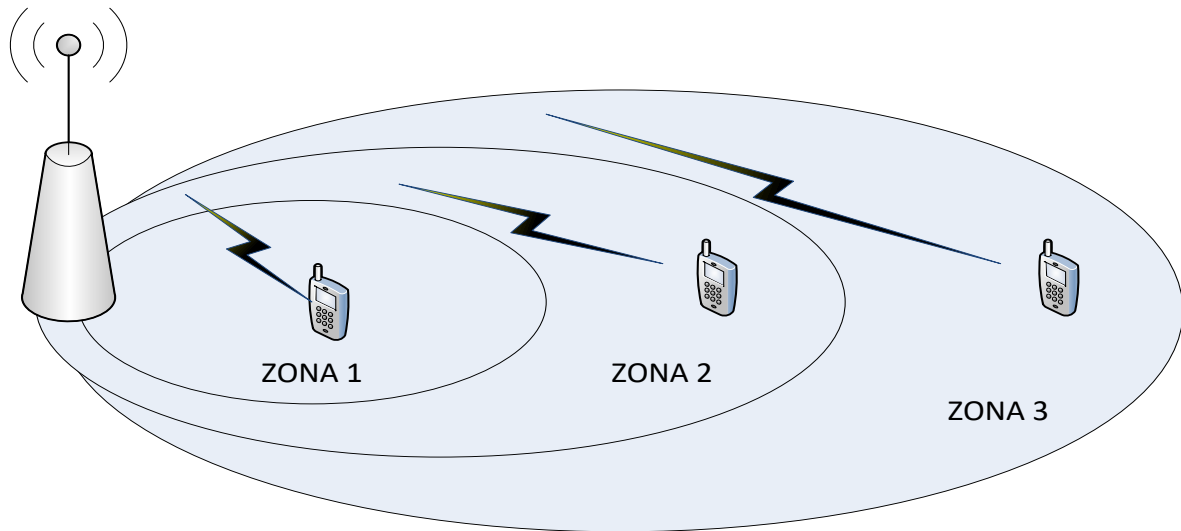


Fig. 5-1 Zonas de análisis del performance de un enlace de descarga

La primera técnica usada en la simulación es CLOSED LOOP SPATIAL MULTIPLEXING (imagen 5-2), con un arreglo de antenas de 2x2, bajo el efecto de los 3 tipos de canal definidos para LTE.

Al realizar las simulaciones en Matlab obtuvimos los siguientes resultados:

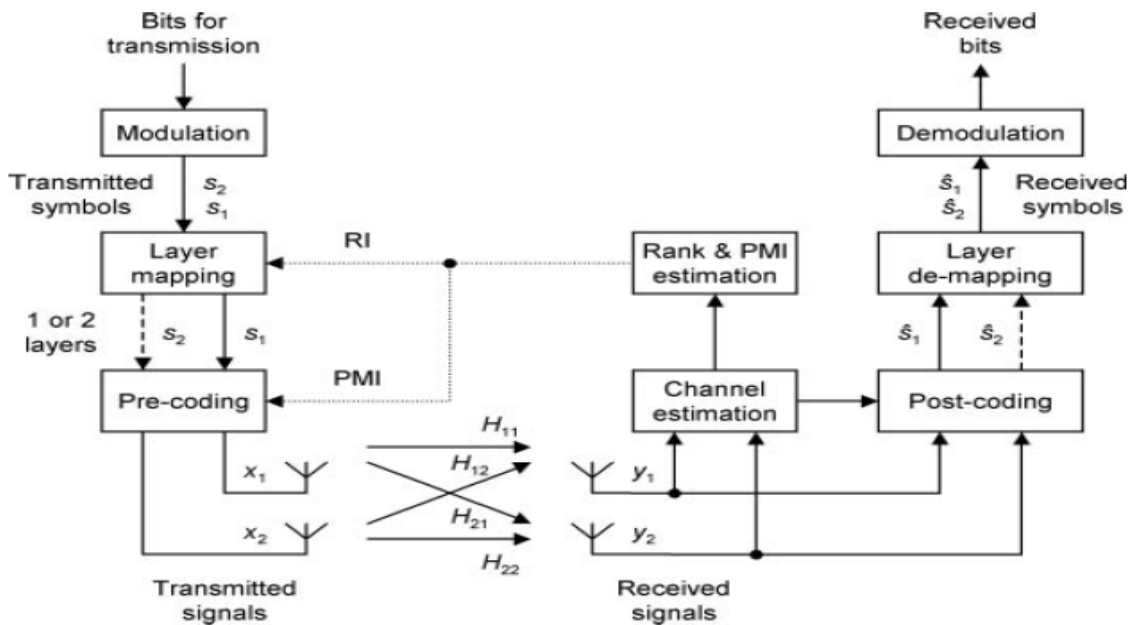


Fig. 5-2 Esquema de close loop spatial multiplexing [16]

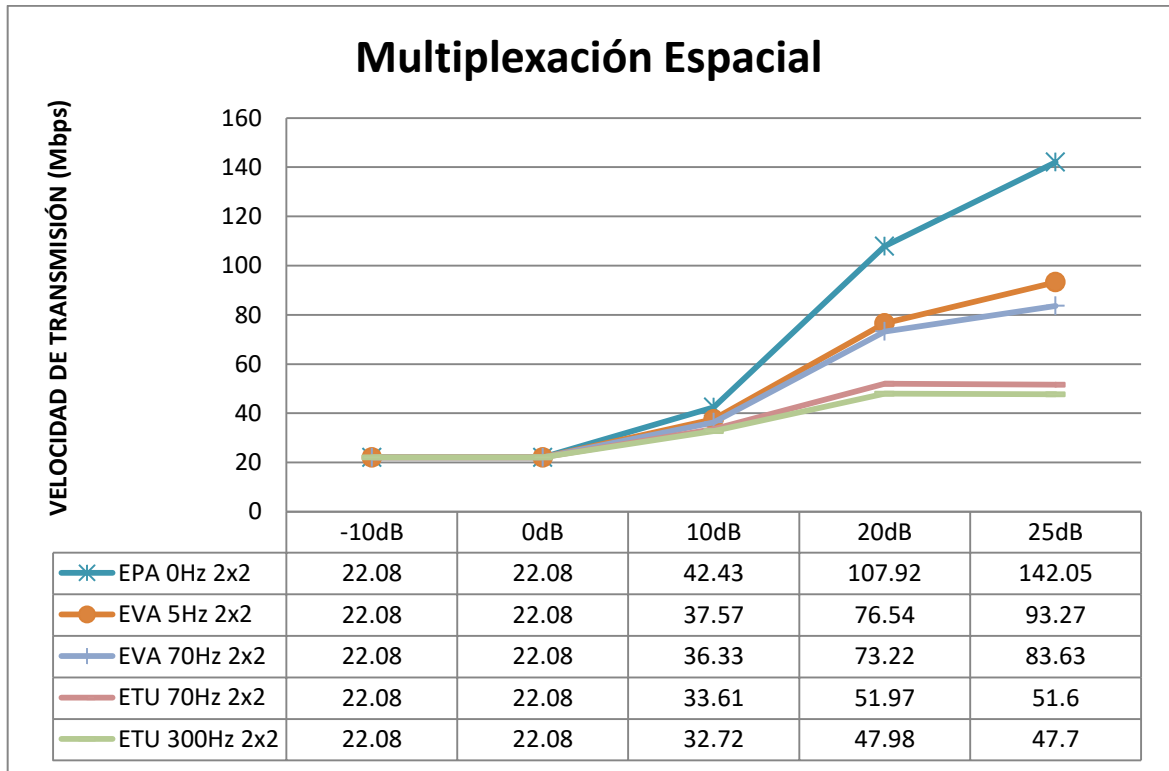


Fig. 5-3 S.M.: SNR vs.Velocidad de transmisión

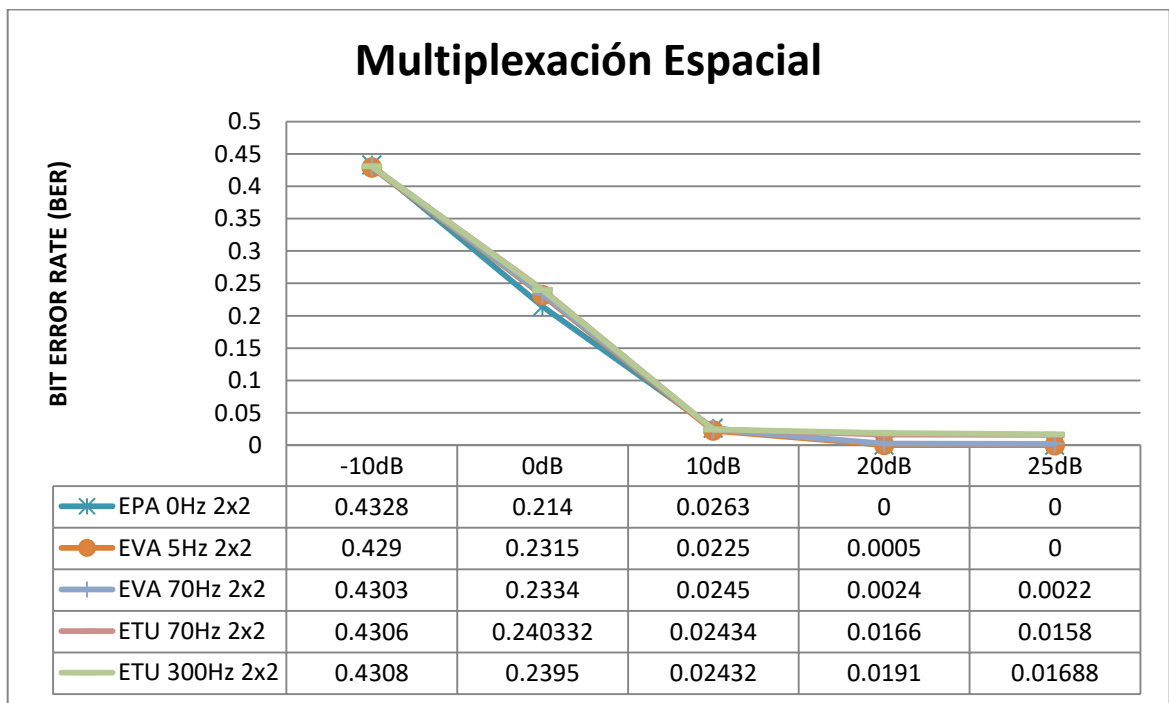


Fig. 5-4 S.M.: SNR vs. Bit Error Rate

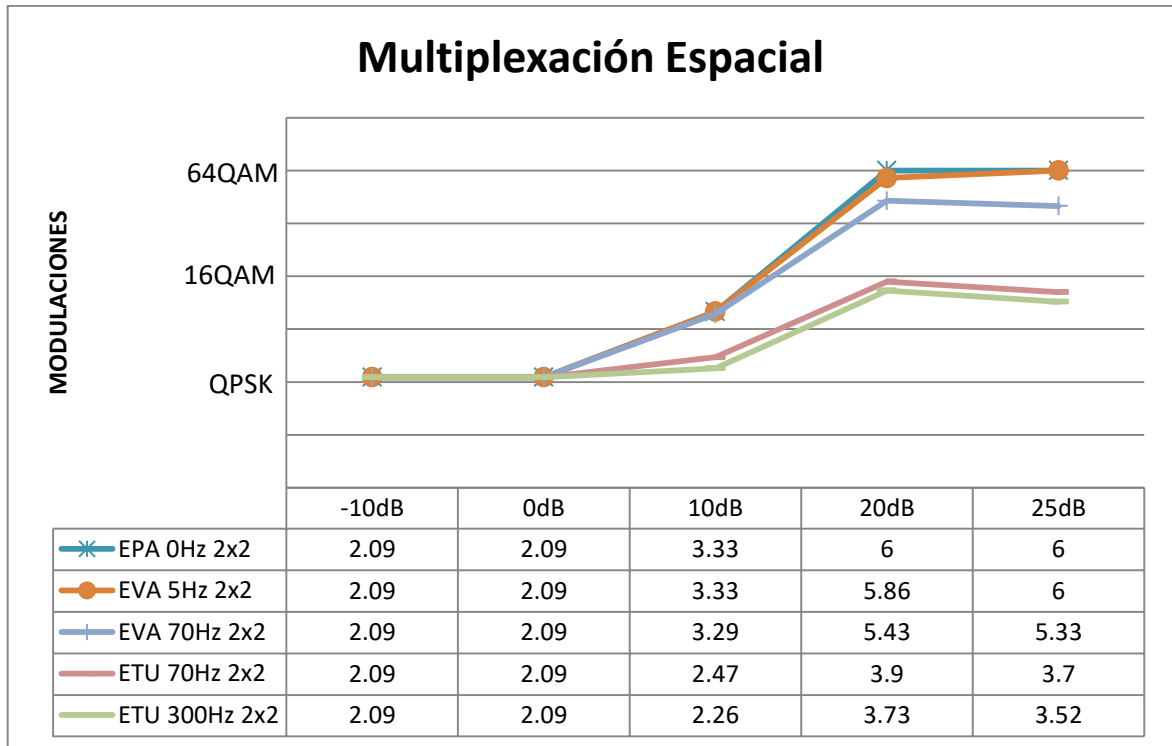


Fig. 5-5 S.M: SNR vs Esquemas de Modulación

Este es el mejor método de transmisión que hay cuando velocidad de transmisión se requiere, puesto que se transmite por cada antena un símbolo distinto, para que esto se pueda lograr se necesita estar en un ambiente de mucha multitrayectoria y con baja movilidad. Puesto que el efecto doppler influye mucho en esta técnica.

La segunda técnica a mostrar es Open loop diversity

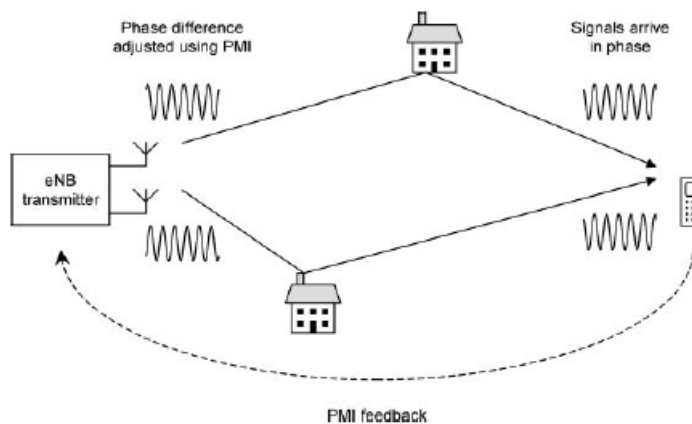


Fig. 5-6 Diversity [16]

Al realizar las simulaciones en Matlab obtuvimos los siguientes resultados:

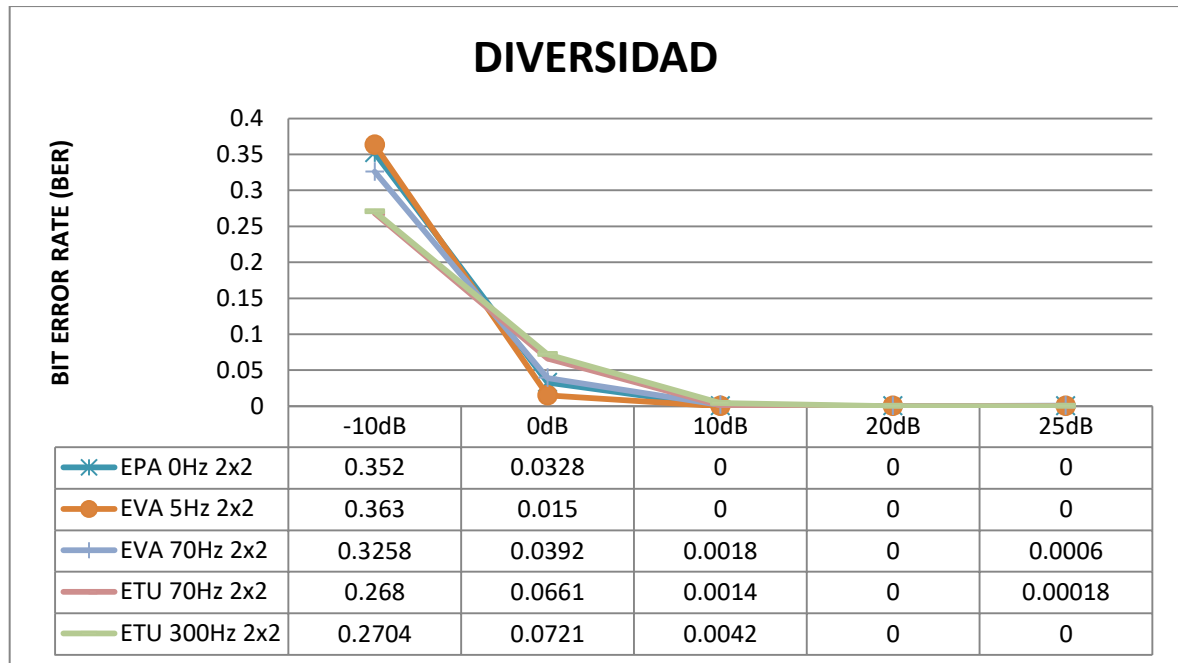


Fig. 5-7 Diversidad: SNR vs.Bit Error Rate

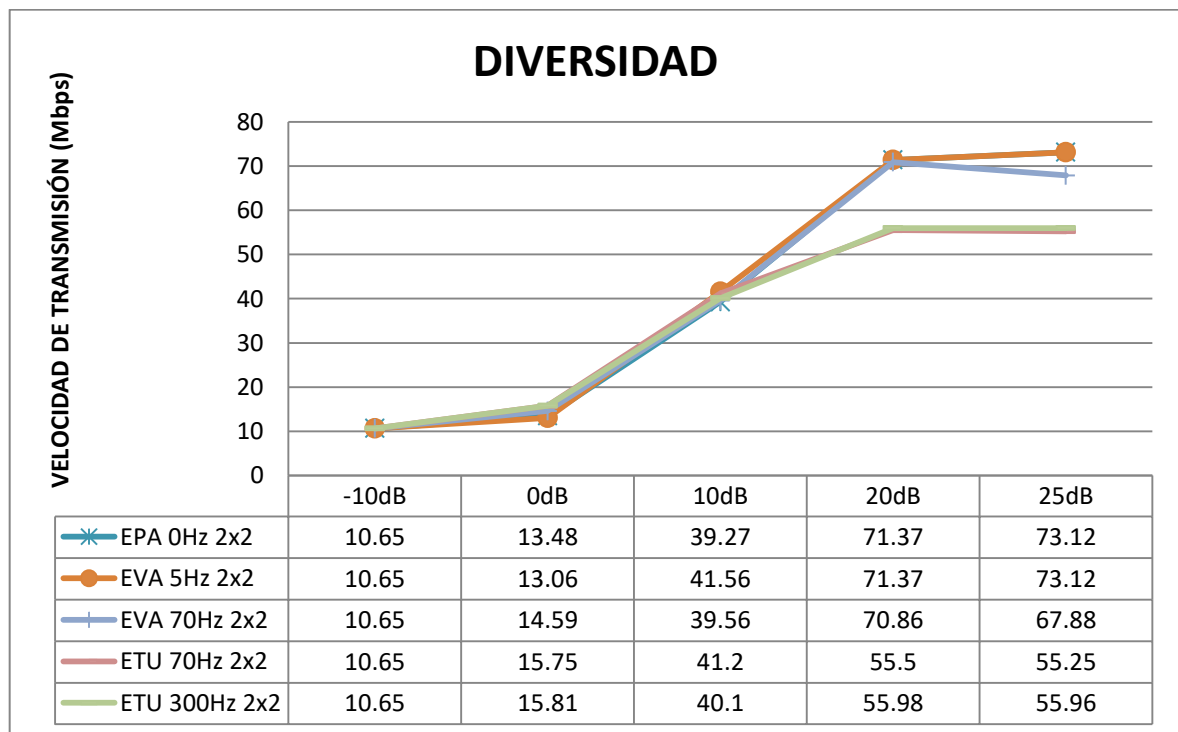


Fig. 5-8 Diversidad: SNR vs. Velocidad de transmisión

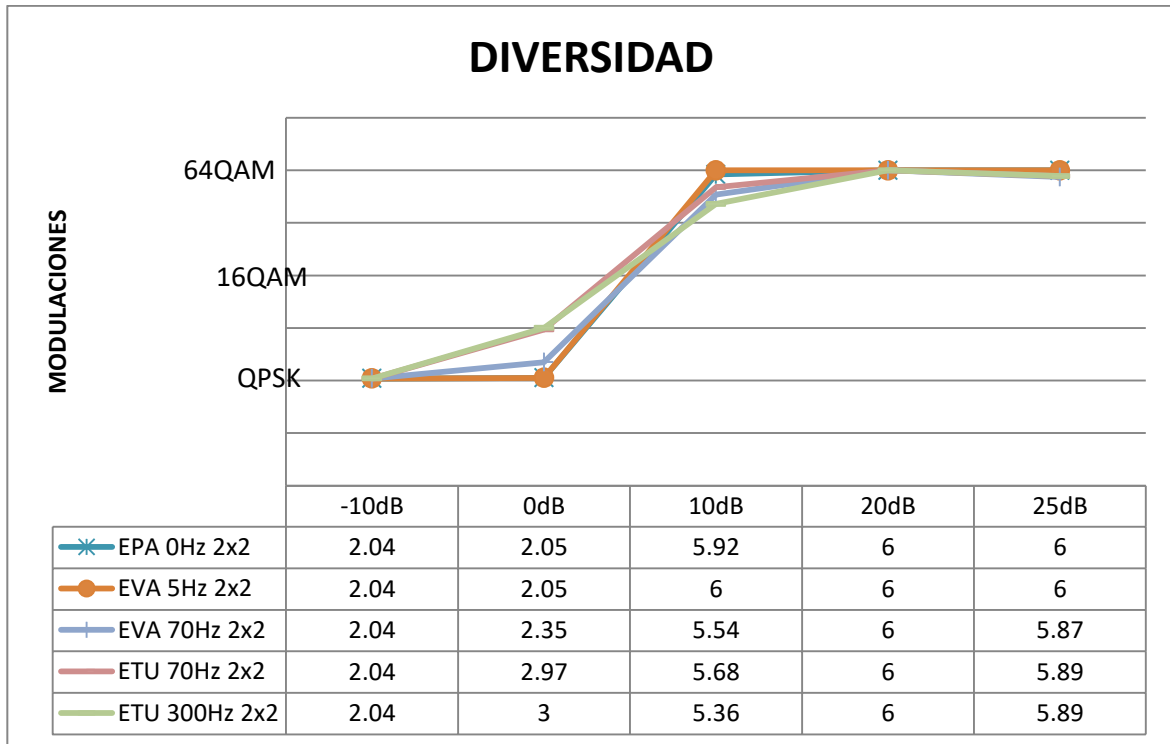


Fig. 5-9 Diversidad: SNR vs. Esquemas de Modulación

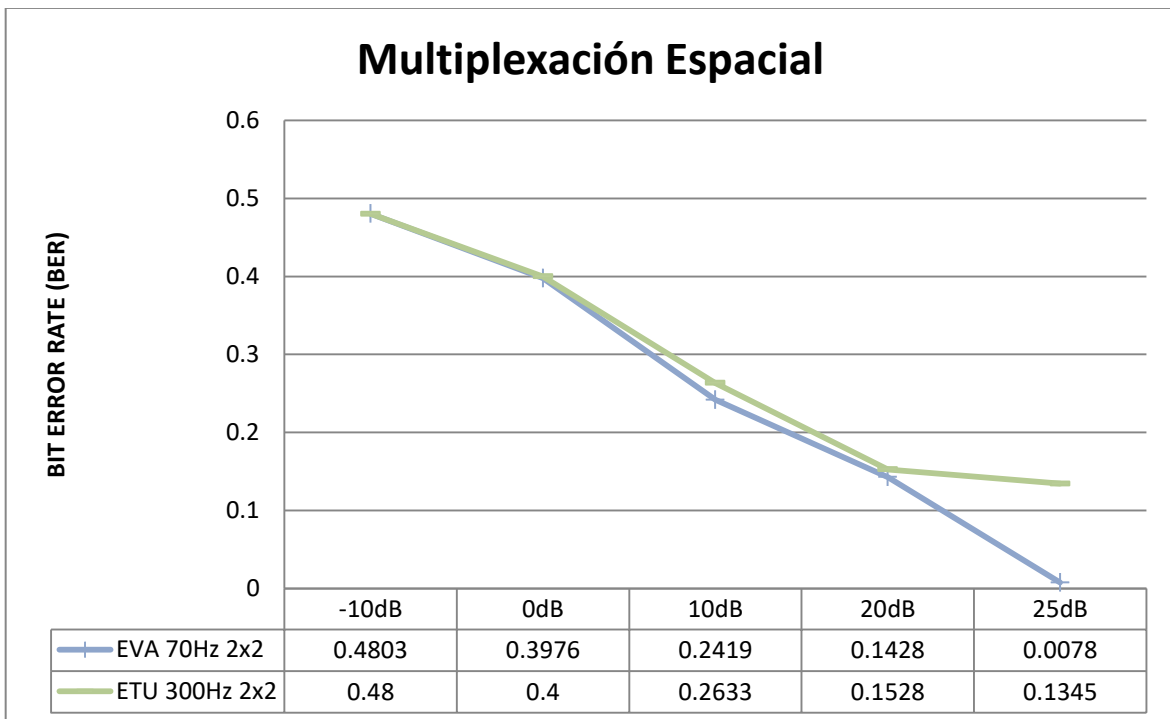


Fig. 5-10 Multiplexación espacial, SNR vs VER sin AMC

La siguiente imagen nos muestra el resultado de una sola corrida de diversidad con MIMO 2x2, como un ejemplo para observar como varia el SINR y por ende el CQI y como esto afecta tanto la velocidad de transmisión como la codificación y el BER.

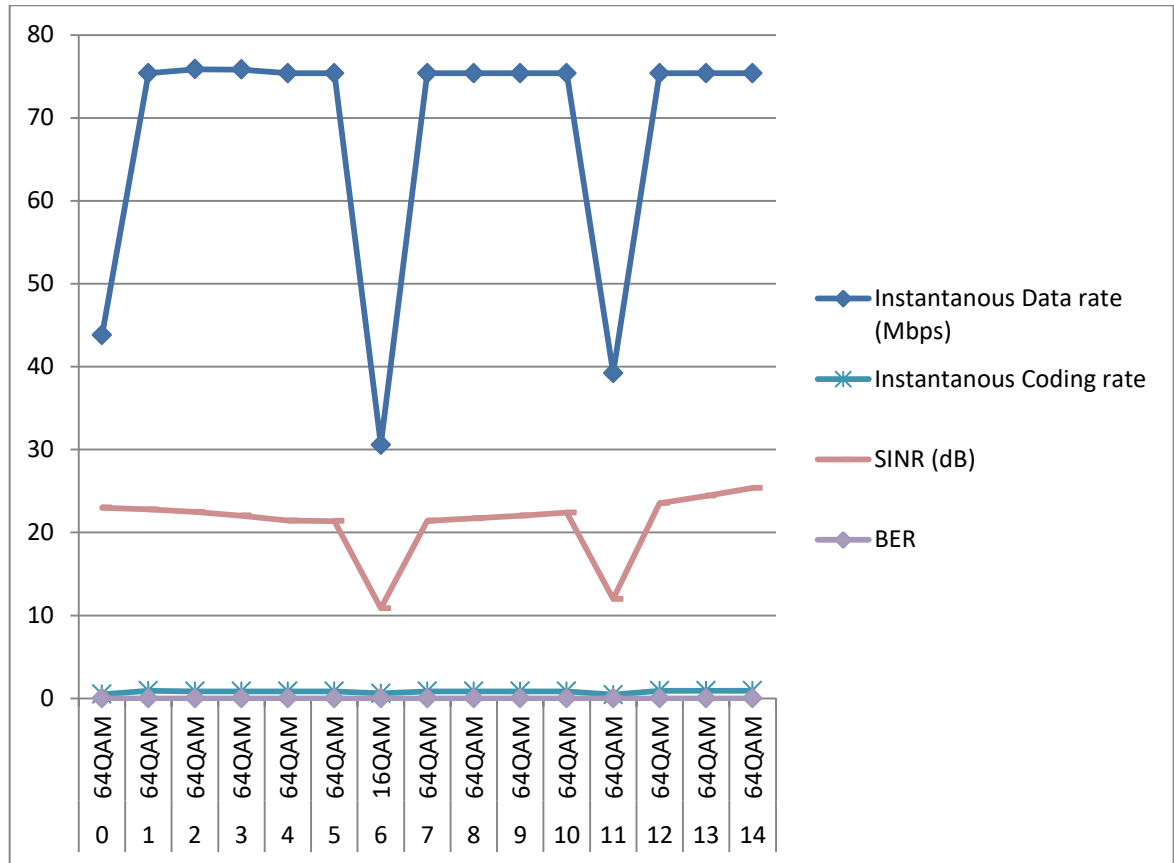


Fig. 5-11 Diversidad, modulación vs BER, code rate, SINR y Velocidad

En la tabla 5-2 observamos los resultados de la simulación anterior,

Tabla 5-2 Tabla de resultados modulaciones vs data rate, BER, code rate y SINR

Simulating LTE with CQI-based adaptation of modulation and coding rate							
Mode 2 transmit diversity							
Subframe	Modulation	Data rate (Mbps)	Modulation rate	Coding rate	SINR (dB)	Average SINR	BER
0	64QAM	43.82	6	0.5	23	23	0
1	64QAM	75.38	6	0.926	22.79	22.9	0
2	64QAM	75.86	6	0.853	22.47	22.75	0
3	64QAM	75.83	6	0.853	22.04	22.58	0
4	64QAM	75.38	6	0.853	21.43	22.35	0
5	64QAM	75.38	6	0.853	21.37	22.18	0.0003
6	16QAM	30.58	4	0.602	10.87	20.57	0.000352
7	64QAM	75.38	6	0.853	21.41	20.67	0.0003
8	64QAM	75.38	6	0.853	21.71	20.79	0.0002
9	64QAM	75.38	6	0.853	22.03	20.91	0.0002
10	64QAM	75.38	6	0.853	22.4	21.05	0.0004
11	64QAM	39.23	6	0.455	11.99	20.29	0.0004
12	64QAM	75.38	6	0.926	23.54	20.54	0.00038
13	64QAM	75.38	6	0.926	24.42	20.82	0.0003
14	64QAM	75.38	6	0.926	25.38	21.12	0.0003

Los siguientes resultados son para modelos de canal de frequency-selective, y flat fading, como modelos de canal regulares, Se pueden observar como a medida que aumenta el SNR aumenta también el esquema de modulación.

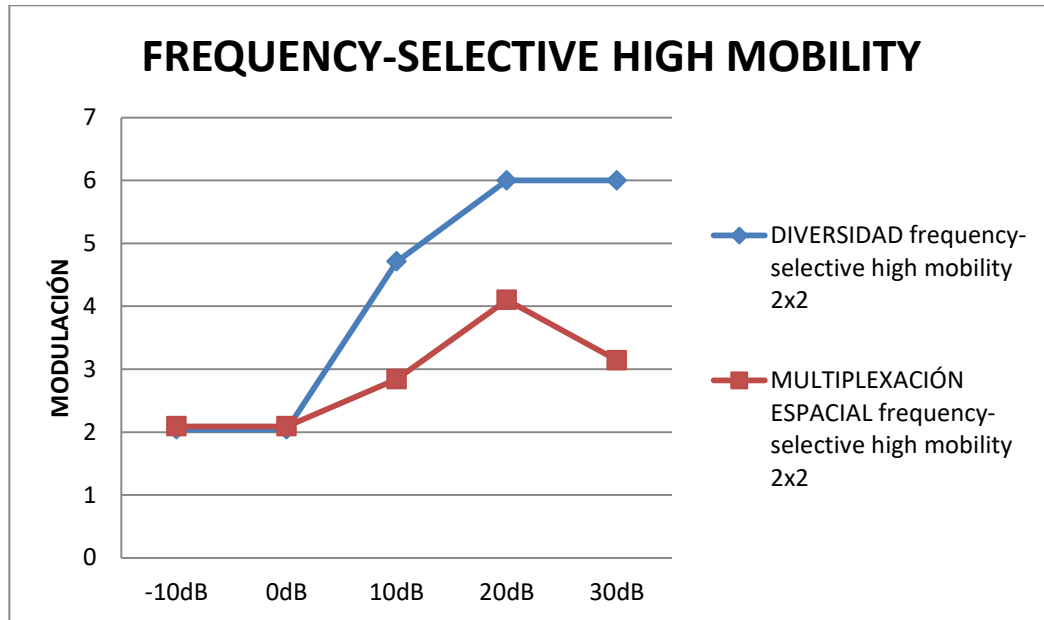


Fig. 5-12 Freq. Selective High Mobility: SNR vs.Modulacion

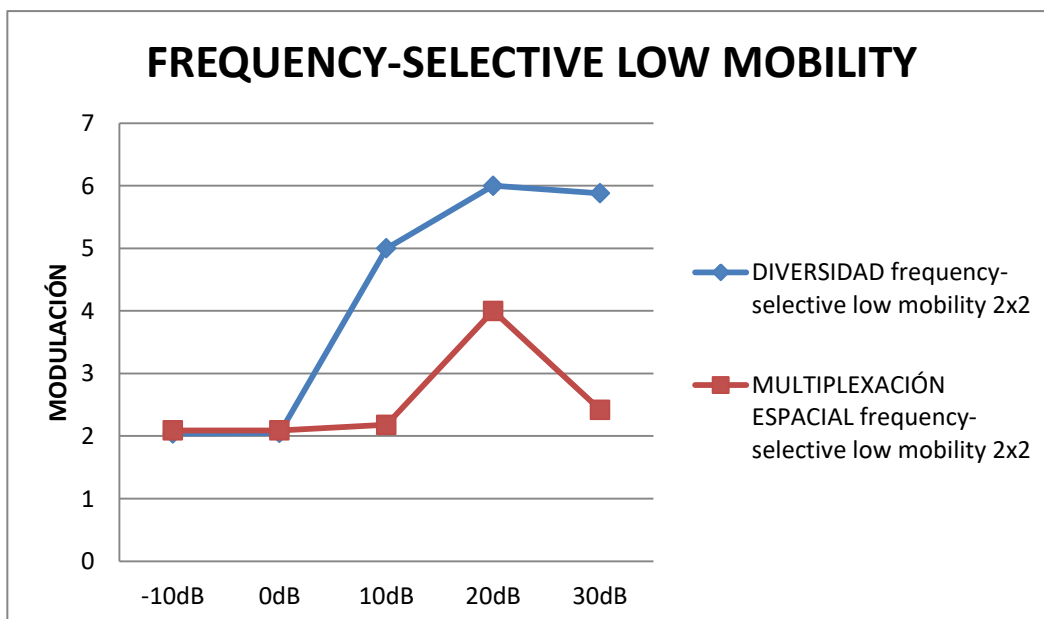


Fig. 5-13 Freq- Selective Low Mobility:SNR vs.Modulaciones

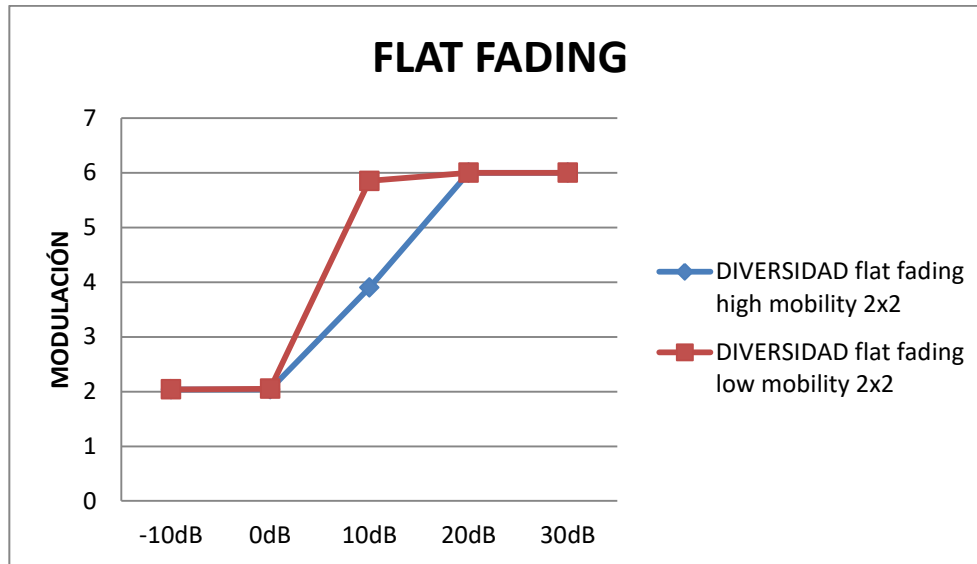


Fig. 5-14 Diversidad Flat Fading Channel: SNR vs.Modulaciones

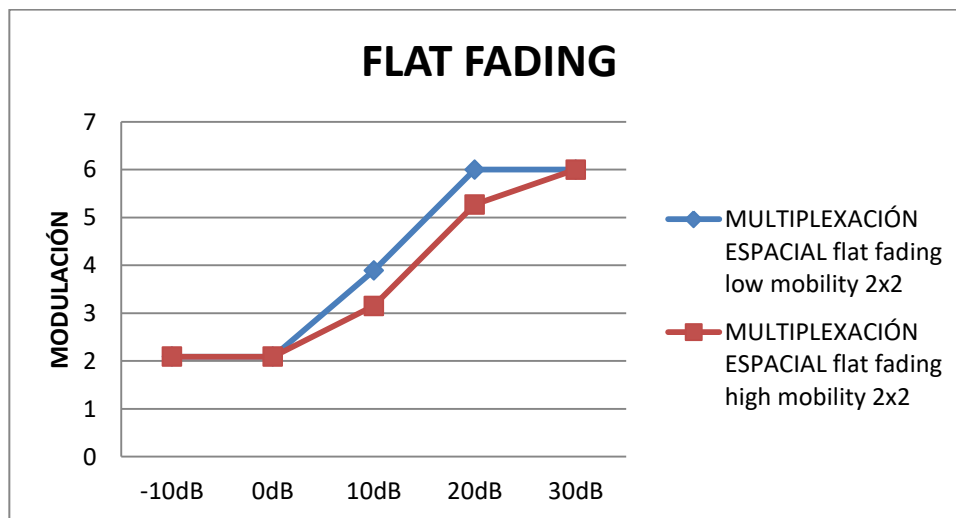


Fig. 5-15 Multiplexación Espacial Flat Fading: SNR vs. Modulaciones

Las imágenes de la Fig. 5-16 son capturas de pantalla instantaneas realizadas en un teléfono Samsung J1 (ver en anexo 2 especificaciones técnicas del equipo), estas corresponden a tres momentos distintos puesto que los screen shots se hacen pantalla por pantalla y es una medida empirica, en estas se realiza un speed test y se capturan los niveles de señal, el CQI y el numero de resources blocks usados, asi como la velocidad del enlace de subida.

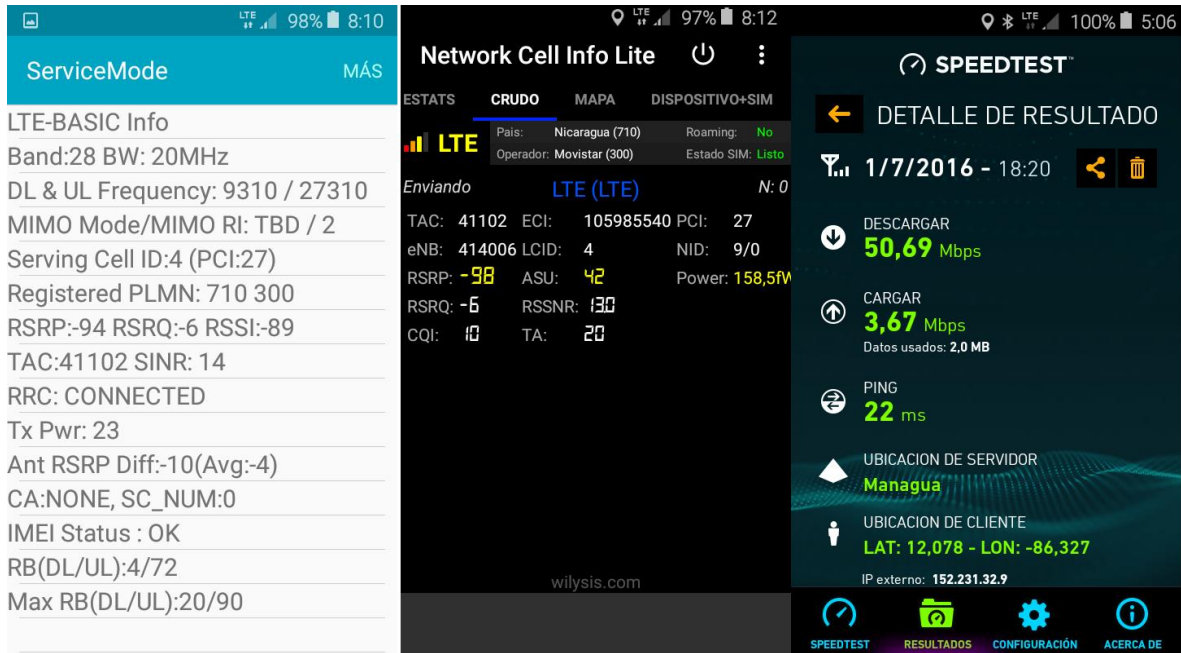


Fig. 5-16 Datos obtenidos desde el móvil Samsung J1

El valor del SINR es de 14, lo que le corresponde un CQI de 10, en modulaciones eso es 64QAM, utilizando solo 20 resources blocks. Nuestras simulaciones tienen una velocidad de mas de 100 Mbps, pero en ellas usamos los 100 resources blocks que posee el canal de 20MHz.

Si analizamos el caso para el canal ETU observamos que QPSK se utiliza cuando las condiciones del canal son más adversas. En esta elección del esquema de modulación entran en juego varios parámetros, el SNR, el número de antenas y el modo de transmisión, QPSK se utiliza mayormente en la multiplexación espacial porque en este modo cada antena transmite un símbolo distinto, a diferencia de la diversidad donde se transmite el mismo símbolo por ambas antenas, al no haber redundancia la multiplexación espacial es más susceptible a errores cuando el canal es muy severo. Por esta razón observamos un mayor uso de QPSK en SM en este canal.

Con la diversidad observamos que el error es cero en muchas ocasiones y que hace uso de esquemas de modulación más altos que la SM bajo las mismas condiciones. Diversidad hace uso de la redundancia de símbolos, al transmitirse el mismo símbolo por ambas antenas entonces la probabilidad de error se disminuye porque hay mayor probabilidad de que al transmitirse duplicados al menos uno de ellos llegue bien a su

destino, lo que lo hace más robusto ante el canal y esto le permite transmitir con modulaciones más altas. Observamos que bajo las mismas condiciones y con un BER mucho menor a SM, la diversidad hace uso de 64QAM. También esto se nota en la velocidad de transmisión. Al utilizar un esquema más alto se obtienen mejores desempeños en la transmisión de datos, una mayor velocidad de transmisión y un BER bajo se traduce en un enlace de mejor calidad.

Para el canal EVA observamos un patrón parecido al anterior, al transmitir en diversidad se obtiene un mejor desempeño que al transmitir en SM., podemos notar que a pesar que la diversidad transmite con un esquema más alto, su velocidad es igual o un poco menor que la velocidad de la SM, sin embargo su BER es menor y esto se traduce en una mejor QoS.

La multiplexación espacial permite multiples antenas para transmitir streams de información de manera independiente, y si el receptor también posee multiples antenas entonces los streams pueden ser separados utilizando técnicas de procesamiento de tiempo-espacio. En lugar de incrementar la diversidad, aquí las multiples antenas se utilizan para aumentar la velocidad de transmisión o la capacidad del sistema. La multiplexación espacial es utilizada con single user MIMO (SU-MIMO) o multiple users MIMO (MU-MIMO).

El transmitir en diversidad incrementa la relación señal a ruido (SNR) en el receptor en lugar de incrementar directamente la velocidad de transmisión. De esta manera se obtiene mayor robustez en la señal en escenarios con desvanecimiento. La diversidad es aplicada utilizando space-frequency block coding (SFBC) y frequency switched transmit diversity (FSTD).

Al comparar estas simulaciones con las simulaciones hechas sin la adaptatividad notamos que el BER rondo cerca del 50%, lo que quiere decir que esos enlaces no fueron eficientes, a pesar de tener un esquema de modulación alto la calidad del servicio era demasiado baja. Si comparamos, solo cuando el SNR era alto entonces los resultados sin adaptatividad eran buenos, sin embargo los usuarios tienen muchas obstrucciones y un buen SNR se logra muy pocas veces, he ahí la necesidad de adaptar acorde a la calidad de la señal, los esquemas de modulación y codificación.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

6 Conclusiones

Después de analizar los resultados obtenidos, podemos concluir que la elección del esquema de modulación correcto es fundamental en el desempeño de una red LTE rel8, es pieza fundamental para mantener el BER bajo y la velocidad de transmisión más alta posible. No solo los esquemas de modulación influyen en la transmisión de LTE al combinarse con las otras técnicas se obtiene un mayor desempeño aun si solo se usan los esquemas en sí con la particularidad que son esquemas de modulación y codificación adaptativos (AMCS).

64-QAM es una componente importante de la interfaz aérea de LTE debido que alcanza tasas de velocidad de transmisión de datos más alta y mayores eficiencias espectrales. Combinado con OFDM y MIMO que combaten con éxito los efectos perjudiciales de los canales inalámbricos y proporciona velocidades de datos en exceso de 300 Mbps en DL (tasa de datos máxima) de acuerdo al estándar de LTE rel8.

Se analizó la tasa de error de bit (BER) y la tasa de velocidad de transmisión de datos (throughput) de los diferentes esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM respectivamente incluyendo la codificación de canal (coding rate), respectivamente para los tres modelos de canal de comunicación definidos para LTE con desvanecimiento por multitrayectoria usados en tres diferentes escenarios: Extended Pedestrian A model (EPA), Extended Vehicular A model (EVA), y Extended Typical Urban model (ETU), incluyendo el análisis básico con canal AWGN.

El conjunto de las técnicas usadas por en el estándar de LTE tales como, MIMO, OFDMA, y los diferentes esquemas de modulación y codificación adaptativo, hacen que LTE sea mas robusto y mas eficiente que sus predecesores, H+, WCDMA, GSM.

Hemos comprobado que mediante el envío del CQI por parte del user equipment al eNodeB le ayuda al eNodeB a elegir el mejor esquema de modulación y codificación para tener una mejor calidad en el enlace de descarga.

7 Recomendaciones y trabajos a futuro

Se recomienda para trabajos futuros un estudio de simulación para el servicio de subida (UL), LTErel8, para la configuración SC-FDMA, (por ejemplo, diferentes modelos de canal de desvanecimiento, diferentes configuraciones MIMO, o control de estudio de funcionamiento del canal.)

Adicionalmente, otro estudio de simulación que se puede realizar, es hacer modificación de las configuraciones actuales de simulación (por ejemplo, diferentes modelos de canal de desvanecimiento, diferentes configuraciones MIMO, o control de estudio de funcionamiento del canal), para LTErel10 (LTE-Advanced).

Se pueden realizar otro tipo de simulaciones con LTE Advance (LTE-A), tomando en cuenta no solo un usuario, sino varios usuarios y hacer el análisis de los esquemas de modulación y como pueden variar entre los mismos usuarios.

8 Bibliografía

- [1] H. H. y. A. Toskala, WCDMA for UMTS HSPA Evolution and LTE, ISBN 978-0-470-31933-8, Finland: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] 3GPP TS 36.104 versio 8.5.0 Release 8, 2009-04.
- [3] J. G. Proakis, Digital Communications, ISBN 978-0072957167, Quinta Edicion ed., New York: McGraw-Hills, 2008.
- [4] E. S. Ha H. Nguyen, A first course in digital comunicaciones, ISBN 978-0-511-57984-4, Cambridge University Press, 2009.
- [5] M. Sauter, From GSM to LTE an introduction to mobile networks and mobile broadband, ISBN 978-0-470-97824-5, John Wiley & Sons, 2011.
- [6] "5G Use Case & Requirements," Nokia Networks, White Paper.
- [7] D. Goldman, "Tecnología," CNN, 5 12 2015. [Online]. Available: <http://cnnespanol.cnn.com/2015/12/05/que-es-la-tecnologia-5g/>. [Accessed 6 Junio 2016].
- [8] C. Coks, An Introduction to LTE, LTE Advance, SAE and 4G Communications, ISBN 978-1-119-97038-5, John Wiley and Sons, 2012.
- [9] LTE 4G Network Design and Planning Optimisation, Student Guide, Mpirical Limited, 2013.
- [10] S. P. J. S. Erik Dahlman, 4G LTE/LTE Advance for mobile broadband, ISBN 978-0-12-385489-6, Academic Press, 2011.
- [11] F. B. F. C. R. F. J. P.-R. O. S. Ramon Agusti, LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles, ISBN 84-934740-4-5, Fundación Vodafone España, 2010.
- [12] "GSM Arena," GSM Arena, 2016. [Online]. Available: [http://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_j1_\(2016\)-7864.php](http://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_j1_(2016)-7864.php). [Accessed 6 Junnio 2016].
- [13] A. F. Molish, Wireless communications, ISBN 978-0-470-74187-0, John Wiley & Sons, 2005.
- [14] R. R. Carlos Ortega, "Guías prácticas de comunicaciones digitales usando Matlab y kit de DSP para contribuir al proceso enseñanza-aprendizaje," Universidad Nacional

de Ingeniería, Managua, 2010.

- [15] F. E. F. F. Victor Torres, "Análisis del comportamiento de esquemas de modulación adaptativos en LTE".
- [16] H. Zarrinkoub, Understanding LTE with Matlab, from mathematical modeling to simulation and prototyping, ISBN 978-1-118-44341-5, John Wiley & Sons, 2014.
- [17] International Telecommunication Union, "Report ITU-R M.2135-1 Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced," Geneva, 2009.
- [18] Mathworks, "Support," Mathworks, [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/lte/ug/propagation-channel-models.html>. [Accessed 6 Junio 2016].
- [19] A. R. M. K. C. Gessner, "UMTS LONG TERM EVOLUTION (LTE) - TECHNOLOGY INTRODUCTION," Rode & Schwartz, 2012.
- [20] G. M. C. U. Ivania Lisseth Zelaya Rodriguez, "Estudio y Simulación Básica de los Sistemas de Comunicaciones Tipo MIMO Usando MATLAB," Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, 2012.
- [21] 3. Americas, MIMO Transmission schemes for LTE and HSPA Networks, 2009.
- [22] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 16, 1998.

I. Anexos

Anexo 1 Códigos de Matlab

```
% PDSCH
txMode      = 4; % Transmisson mode one of {1, 2, 4}
numTx       = 2; % Number of transmit antennas
numRx       = 2; % Number of receive antennas
chanBW      = 6; % [1,2,3,4,5,6] maps to [1.4, 3, 5, 10, 15, 20]MHz
contReg     = 1; % {1,2,3} for >=10MHz, {2,3,4} for <10Mhz
modType     = 3; % [1,2,3] maps to ['QPSK','16QAM','64QAM']
% DLSCH
cRate       = 1/2; % Rate matching target coding rate
maxIter     = 6; % Maximum number of turbo decoding terations
fullDecode  = 0; % Whether "full" or "early stopping" turbo decoding is performed
% Channel
chanMdl     = 'frequency-selective'; % Channel model, 'frequency-selective', 'flat'
Doppler     = 300; % Average Doppler shift
% one of {'flat-low-mobility', 'flat-high-mobility','frequency-selective-low-mobility',
% 'frequency-selective-high-mobility', 'EPA 0Hz', 'EPA 5Hz', 'EVA 5Hz', 'EVA 70Hz', 'frequency-
% selective', 'ETU 70Hz', 'ETU 300Hz'}
corrLvl     = 'Low';
% Simulation parametrs
Eqmode      = 2; % Type of equalizer used [1,2,3] for ['ZF', 'MMSE','Sphere Decoder']
chEstOn     = 1; % use channel estimation or ideal channel
snrdB       = 30; % Signal to Noise Ratio in dB
maxNumErrs  = 1e6; % Maximum number of errors found before simulation stops
maxNumBits  = 1e6; % Maximum number of bits processed before simulation stops
visualsOn   = 0; % Whether to visualize channel response and constellations
numCodeWords = 1; % Number of codewords in PDSCH
enPMIfbck   = 1; % Enable/Disable Precoder Matrix Indicator (PMI) feedback
cbldx       = 1; % Initialize PMI index
sinr = 23;

% Script for MIMO LTE (mode 4)
%
% Single codeword transmission
%
clear functions
%% Set simulation parametrs & initialize parameter structures
commlteMIMO_params_amc;
[prmLTEPDSCH, prmLTEDLSCH, prmMdl] = commlteMIMO_initialize(txMode, ...
    chanBW, contReg, modType, Eqmode, numTx, numRx, cRate, maxIter, fullDecode, chanMdl,
    Doppler, corrLvl, ...
    chEstOn, numCodeWords, enPMIfbck, cbldx, snrdB, maxNumErrs, maxNumBits);
clear txMode chanBW contReg modType Eqmode numTx numRx cRate maxIter fullDecode
chanMdl Doppler corrLvl chEstOn numCodeWords enPMIfbck cbldx snrdB maxNumErrs
maxNumBits
%%
disp('Simulating LTE with CQI-based adaptation of modulation and coding rate');
disp('Mode 4 Closed loop Spatial Multiplexing');
hPBER = comm.ErrorRate;
snrdB=prmMdl.snrdB;
```

```
maxNumErrs=prmMdl.maxNumErrs;
maxNumBits=prmMdl.maxNumBits;
%% Simulation loop
tic;
Frame=0;
nS = 0; % Slot number, one of [0:2:18]
Measures = zeros(3,1); %initialize BER output
%BERate = 0;
while (Measures(3) < maxNumBits)
    %% One subframe step processing
    [dataIn, dataOut, txSig, rxSig, dataRx, yRec, csr, snir] = ...
        commlteMIMO_SM_step(nS, snrdB, prmLTEDLSCH, prmLTEPDSCH, prmMdl);
    %% Report average data rates
    fprintf(1, '\n---\nSubframe          = %d\n', Frame);
    ADR=zReport_data_rate_average(prmLTEPDSCH, prmLTEDLSCH, snir);
    %% CQI feedback
    sinr=CQIselection(dataOut, yRec, nS, prmLTEDLSCH, prmLTEPDSCH);
    [modType, cRate]=CQI2indexMCS(sinr);
    %% Calculate bit errors
    Measures = step(hPBer, dataIn, dataOut);
    %BERate = Measures(1);
    %% Visualize results
    if (visualsOn && prmLTEPDSCH.Eqmode~=3)
        zVisualize( prmLTEPDSCH, txSig, rxSig, yRec, dataRx, csr, nS);
        zVisSinr(sinr);
    end;
    if (Frame == 0)
        fprintf(1, 'Bits processed          = %d\n', Measures(3));
        fprintf(1, 'BER                          = %g\n', Measures(1));
        BErsum = Measures(1);
    else
        fprintf(1, 'Bits processed          = %d\n', Measures(3));
        fprintf(1, 'BER                          = %g\n', Measures(1));
        BErsum = BErsum + Measures(1);
        BErprom = BErsum/(Frame+1);
        fprintf(1, 'BER PROM                  = %g\n', BErprom);
        %BERprom = rberrorrate( BErsum );
    end;
    % Update subframe number
    nS = nS + 2; if nS > 19, nS = mod(nS, 20); end;
    Frame=Frame+1;
    % Adaptive change of modulation and coding rate
    [prmLTEPDSCH, prmLTEDLSCH, prmMdl] = commlteMIMO_update(...
        prmLTEPDSCH, prmLTEDLSCH, prmMdl, modType, cRate);
end
toc;

function [dataIn, dataOut, txSig, rxSig, dataRx, yRec, csr_ref, sinrstep]...
    = commlteMIMO_SM_step(nS, snrdB, prmLTEDLSCH, prmLTEPDSCH, prmMdl)
%% TX
persistent hPBer1
if isempty(hPBer1), hPBer1=comm.ErrorRate; end;
% Generate payload
dataIn = genPayload(nS, prmLTEDLSCH.TBLenVec);
```

```
% Transport block CRC generation
tbCrcOut1 =CRCgenerator(dataIn);
% Channel coding includes - CB segmentation, turbo coding, rate matching,
% bit selection, CB concatenation - per codeword
[data, Kplus1, C1] = lteTbChannelCoding(tbCrcOut1, nS, prmLTEDLSCH, prmLTEPDSCH);
%Scramble codeword
scramOut = Scramble(data, nS, 0, prmLTEPDSCH.maxG);
% Modulate
modOut = Modulator(scramOut, prmLTEPDSCH.modType);
% Map modulated symbols to layers
numTx=prmLTEPDSCH.numTx;
LayerMapOut = LayerMapper(modOut, [], prmLTEPDSCH);
usedCbIdx = prmMdl.cbIdx;
% Precoding
[PrecodeOut, Wn] = SpatialMuxPrecoder(LayerMapOut, prmLTEPDSCH, usedCbIdx);
% Generate Cell-Specific Reference (CSR) signals
csr = CSRgenerator(nS, numTx);
csr_ref=complex(zeros(2*prmLTEPDSCH.Nrb, 4, numTx));
for m=1:numTx
    csr_pre=csr(1:2*prmLTEPDSCH.Nrb, :, m);
    csr_ref(:, :, m)=reshape(csr_pre, 2*prmLTEPDSCH.Nrb, 4);
end
% Resource grid filling
txGrid = REmapper_mTx(PrecodeOut, csr_ref, nS, prmLTEPDSCH);
% OFDM transmitter
txSig = OFDMTx(txGrid, prmLTEPDSCH);
%% Channel
% MIMO Fading channel
[rxFade, chPathG] = MIMOFadingChan(txSig, prmLTEPDSCH, prmMdl);
% Add AWG noise
sigPow = 10*log10(var(rxFade));
nVar = 10.^(0.1.*(sigPow-snrdB));
rxSig = AWGNChannel(rxFade, nVar);
%% RX
% OFDM Rx
rxGrid = OFDMRx(rxSig, prmLTEPDSCH);
% updated for numLayers -> numTx
[dataRx, csrRx, idx_data] = REdemapper_mTx(rxGrid, nS, prmLTEPDSCH);
% MIMO channel estimation
if prmMdl.chEstOn
    chEst = ChanEstimate_mTx(prmLTEPDSCH, csrRx, csr_ref, prmMdl.chEstOn);
    hD = ExtChResponse(chEst, idx_data, prmLTEPDSCH);
else
    idealChEst = IdChEst(prmLTEPDSCH, prmMdl, chPathG);
    hD = ExtChResponse(idealChEst, idx_data, prmLTEPDSCH);
end
% Frequency-domain equalizer
if (numTx==1)
    % Based on Maximum-Combining Ratio (MCR)
    yRec = Equalizer_simo(dataRx, hD, nVar, prmLTEPDSCH.Eqmode);
else
    % Based on Spatial Multiplexing
    yRec = MIMOREceiver(dataRx, hD, prmLTEPDSCH, nVar, Wn);
end
% Post-detection Sinr computation
```

```

Gamma = Sinr_MMSE(hD, nVar, Wn);
sinr=10*log10(mean(Gamma));
sinrstep=sinr; %mod
% Demap received codeword(s)
[cwOut, ~] = LayerDemapper(yRec, prmlTEPD SCH);
if prmlTEPD SCH.Eqmode < 3
    % Demodulate
    demodOut = DemodulatorSoft(cwOut, prmlTEPD SCH.modType, max(nVar));
else
    demodOut = cwOut;
end
% Descramble received codeword
rxCW = Descramble(demodOut, nS, 0, prmlTEPD SCH.maxG);
% Channel decoding includes - CB segmentation, turbo decoding, rate dematching
[decTbData1, ~, ~] = lteTbChannelDecoding(nS, rxCW, Kplus1, C1, prmlTEDLSCH,
prmlTEPD SCH);
% Transport block CRC detection
[dataOut, ~] = CRCdetector(decTbData1);
end

```

Anexo 2 Hoja técnica del Samsung J1 [12]

NETWORK	Technology	<u>GSM / HSPA / LTE</u>
	<u>2G bands</u>	GSM 850 / 900 / 1800 / 1900 - SIM 1 & SIM 2 (dual-SIM model only)
	<u>3G bands</u>	HSDPA 850 / 900 / 1900 / 2100 - J120F
		HSDPA 850 / 2100 - J120A
	<u>4G bands</u>	LTE band 1(2100), 3(1800), 5(850), 7(2600), 8(900), 20(800) - J120F
		LTE band 1(2100), 2(1900), 3(1800), 4(1700/2100), 5(850), 7(2600), 12(700) - J120A
	<u>Speed</u>	HSPA 21.1/5.76 Mbps, LTE Cat4 150/50 Mbps
	<u>GPRS</u>	Yes
	<u>EDGE</u>	Yes
LAUNCH	<u>Announced</u>	2016, January

	<u>Status</u>	Available. Released 2016, January
BODY	<u>Dimensions</u>	132.6 x 69.3 x 8.9 mm (5.22 x 2.73 x 0.35 in)
	<u>Weight</u>	131 g (4.62 oz)
	<u>SIM</u>	Single SIM (Micro-SIM) or Dual SIM (Micro-SIM, dual stand-by)
DISPLAY	<u>Type</u>	Super AMOLED capacitive touchscreen, 16M colors
	<u>Size</u>	4.5 inches (~44.8% screen-to-body ratio)
	<u>Resolution</u>	480 x 800 pixels (~245 ppi pixel density)
	<u>Multitouch</u>	Yes
PLATFORM	<u>OS</u>	Android OS, v5.1.1 (Lollipop)
	<u>Chipset</u>	Spreadtrum SC9830
	<u>CPU</u>	Quad-core 1.3 GHz Cortex-A7
	<u>GPU</u>	Mali-400
MEMORY	<u>Card slot</u>	microSD, up to 256 GB (dedicated slot)
	<u>Internal</u>	8 GB, 1 GB RAM
CAMERA	<u>Primary</u>	5 MP, f/2.2, autofocus, LED flash
	<u>Features</u>	Geo-tagging, touch focus, face detection
	<u>Video</u>	720p@30fps
	<u>Secondary</u>	2 MP, f/2.2
SOUND	<u>Alert types</u>	Vibration; MP3, WAV ringtones
	<u>Loudspeaker</u>	Yes
	<u>3.5mm jack</u>	Yes
COMMS	<u>WLAN</u>	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Wi-Fi Direct, hotspot
	<u>Bluetooth</u>	v4.1, A2DP, LE
	<u>GPS</u>	Yes, with A-GPS, GLONASS

FEATURES	<u>Radio</u>	FM radio, RDS, recording
	<u>USB</u>	microUSB v2.0
	<u>Sensors</u>	Accelerometer, proximity
	<u>Messaging</u>	SMS(threaded view), MMS, Email, Push Mail, IM
	<u>Browser</u>	HTML
	<u>Java</u>	No
		<ul style="list-style-type: none">- MP4/H.264 player- MP3/WAV/eAAC+/Flac player- Photo/video editor- Document viewer

Disclaimer. We can not guarantee that the information on this page is 100% correct.